

ABUNDÂNCIA QUÍMICA DE GALÁXIAS ANÃS: CALIBRAÇÃO DE METALICIDADE

Pedro Camargo Santos, Oli Luiz Dors Junior, Gleicy Caroline de Almeida, Telmo Claudinei Machado

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil. pedrocsantos74@gmail.com, dorsjunior@gmail.com, almeida.gcy@gmail.com, telmo.machado@gmail.com.

Resumo

Este trabalho apresenta uma calibração para estimar a metalicidade em Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs, do inglês *Active Galactic Nuclei*) de baixa massa, a partir das linhas de emissão usadas nos diagramas BPT ($\log ([\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ e $\log ([\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$), combinando dados observacionais de 99 objetos confirmadamente AGNs com uma grade de 2160 modelos de fotoionização gerados com o código CLOUDY. São analisadas as limitações dos métodos tradicionais de diagnóstico da fonte de ionização em ambientes de baixa abundância de metais. Os resultados mostram que, de acordo com os critérios do BPT, apenas quatro objetos são classificados como AGNs, sete como fontes compostas e a maioria como regiões de formação estelar. Esse comportamento reflete uma limitação intrínseca do diagrama em galáxias anãs: a baixa metalicidade desloca as razões de linhas para a região tipicamente associada a formação estelar, levando à subestimação da fração real de AGNs. Além disso, verifica-se que os objetos seguem a tendência da relação massa-metalicidade, e que baixas metalicidades ($Z \lesssim 0,30 Z_{\odot}$) concentram-se em regiões de baixo $\log ([\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$.

Palavras-chave: abundância; núcleos ativos; evolução química; galáxias ativas.

Área do Conhecimento: Astronomia, Astrofísica.

Introdução

Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs, do inglês *Active Galactic Nuclei*) são regiões centrais muito luminosas, cuja radiação é gerada pela acreção de matéria em buracos negros massivos. Esses buracos negros podem variar desde massas intermediárias (*Intermediate-Mass Black Holes*, IMBHs), entre 10^2 e $10^6 M_{\odot}$, até buracos negros supermassivos (*Supermassive Black Holes*, SMBHs), com massas entre 10^6 e $10^{10} M_{\odot}$. A evolução dos AGNs está intimamente ligada às propriedades da galáxia hospedeira e sua origem permanece incerto para a cosmologia observacional (BELLOVARY *et al.*, 2011). Segundo Maiolino *et al.* (2024), esses objetos teriam se formado inicialmente como IMBHs em redshifts elevados. Tanto SMBHs quanto IMBHs crescem principalmente por acreção de matéria ao longo do tempo (VOLONTERI, 2010).

Diversos processos físicos, como formação estelar, acreção de gás, interações gravitacionais e fluxos de matéria, influenciam a evolução química das galáxias. Esses fenômenos são refletidos em propriedades como a metalicidade do gás, massa estelar (M_*) e eficiência na conversão de gás em estrelas. A relação massa-metalicidade é fundamental para entender a evolução de galáxias e seus buracos negros centrais. Estudos como Hidalgo (2017) mostram que, embora a inclinação da MZR não varie significativamente com o tempo, a inclusão da taxa de formação estelar revela uma correlação com o *redshift* (z), onde a massa tende a diminuir como aumento de z .

A metalicidade, geralmente expressa pela abundância de oxigênio, está diretamente ligada à história de formação estelar e à evolução química, e influencia a emissão espectral e o meio interestelar. A metalicidade pode ser estimada pelo método da temperatura eletrônica (T_e), que usa razões entre linhas de emissão de um mesmo íon com diferentes níveis de excitação, ou por métodos baseados em linhas fortes. O método T_e se baseia na medição de temperaturas das regiões dominadas por íons como O^+ , O^{2+} e N^+ através de razões específicas entre linhas, conforme descrito em Hägele *et al.* (2008) e detalhado em Dors O. L. (2020). Contudo, devido à dificuldade em medir certas linhas aurais, especialmente em AGNs, métodos alternativos baseados em linhas fortes foram desenvolvidos, como as calibrações propostas por Storchi-Bergmann *et al.* (1998).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Estudos de metalicidade em AGNs focam principalmente em galáxias Seyfert, enquanto AGNs em galáxias anãs são menos explorados devido às suas propriedades peculiares que dificultam a identificação por métodos tradicionais. Os diagramas de diagnóstico clássicos, como os diagramas BPT (BALDWIN; PHILLIPS; TERLEVICH, 1981), que utilizam razões entre linhas ópticas para distinguir regiões ionizadas por estrelas de AGNs, apresentam limitações em ambientes de baixa metalicidade típicos de galáxias anãs. Nesses casos, AGNs podem ser classificados erroneamente como regiões de formação estelar.

Neste trabalho, propomos uma nova calibração de metalicidade para AGNs de baixa massa, combinando modelos de fotoionização com uma amostra observacional. A organização do artigo é a seguinte: a Seção 2 detalha a metodologia, a Seção 3 apresenta os resultados e suas implicações, e a Seção 4 resume as conclusões principais.

Metodologia

Dados Observacionais

A seleção dos dados observacionais construiu um catálogo de galáxias anãs ativas cruzando 65.461 anãs do SDSS com fontes de raios X do eROSITA dentro de um raio equivalente a 98% da incerteza posicional, encontrando 198 pares iniciais. Uma simulação de deslocamento aleatório indicou que cerca de 17% dessas associações seriam ao acaso. Seguiu-se uma limpeza em várias etapas: remoção de duplicatas, exclusão de 14 quasares identificados no SDSS e Simbad, eliminação de 64 casos de galáxias massivas ou fragmentos fotométricos detectados no MPA-JHU e NSA, e descarte de 16 fontes via inspeção visual (incluindo regiões H II e estrelas), resultando em 99 objetos. A análise espectral, limitada por um número mediano de 20 contagens por fonte, mostrou que 86 objetos têm índices de fóton compatíveis com AGNs típicos (1,5–2,5), três são mais suaves e dez mais duros, permitindo o cálculo de fluxos e luminosidades. (Para ver a descrição completa da seleção da amostra, ver Bykov *et al.* (2024)).

Modelos de Fotoionização

Para a derivação das metalicidades dos AGNs, foram empregados vários modelos de fotoionização calculados com a versão 23 do código CLOUDY (FERLAND, 2017). Os parâmetros adotados foram definidos com base em estudos prévios e em características observacionais típicas de AGNs em galáxias anãs, a saber:

- **Metalicidade:** Foram adotados valores em relação à metalicidade solar ($Z/Z_{\odot}$) entre 0,20 e 0,55 com passo de 0,05. A abundância solar de oxigênio ($12 + \log(O/H)_{\odot}$) é igual a 8,69 (PRIETO; LAMBERT; ASPLUND, 2001; ASPLUND *et al.*, 2009). Dessa forma, a faixa de valores adotados corresponde a $8,00 \leq 12 + \log(O/H) \leq 8,43$. As abundâncias dos elementos pesados foram escaladas linearmente com a metalicidade, com exceção do nitrogênio, para o qual será utilizada a relação empírica $\log(N/O) = 1,29 \times [12 + \log(O/H)] - 11,84$ proposta por Carvalho *et al.* (2020).
- **Parâmetro de ionização:** Definido como $U = Q(H)/[4\pi R^2 n(H)c]$ onde $Q(H)$ (s^{-1}) representa o número de fótons ionizantes emitidos pela fonte central, R^2_0 (cm) é a distância da fonte até a superfície interna da nuvem ionizada, $n(H)$ (cm^{-3}) é a densidade de hidrogênio, e c ($cm s^{-1}$) é a velocidade da luz. Os valores adotados estão no intervalo $-4,00 \leq \log U \leq -1,00$ com passo de 0,20.
- **Densidade eletrônica (N_e):** Foram adotados valores constantes de densidade eletrônica ao longo do raio nebuloso, variando entre 10^2 e $3 \times 10^3 cm^{-3}$ com passo de $6 \times 10^2 cm^{-3}$, uma vez que modelos com gradientes radiais de densidade apresentam influência desprezível sobre as razões de linhas previstas (DORS *et al.*, 2019).
- **α_{ox} :** Trata-se de um índice espectral que representa a inclinação de uma lei de potência entre os fluxos em 2 keV e 2500 Å. Foram considerados valores entre -1,30 e -0,90 com

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

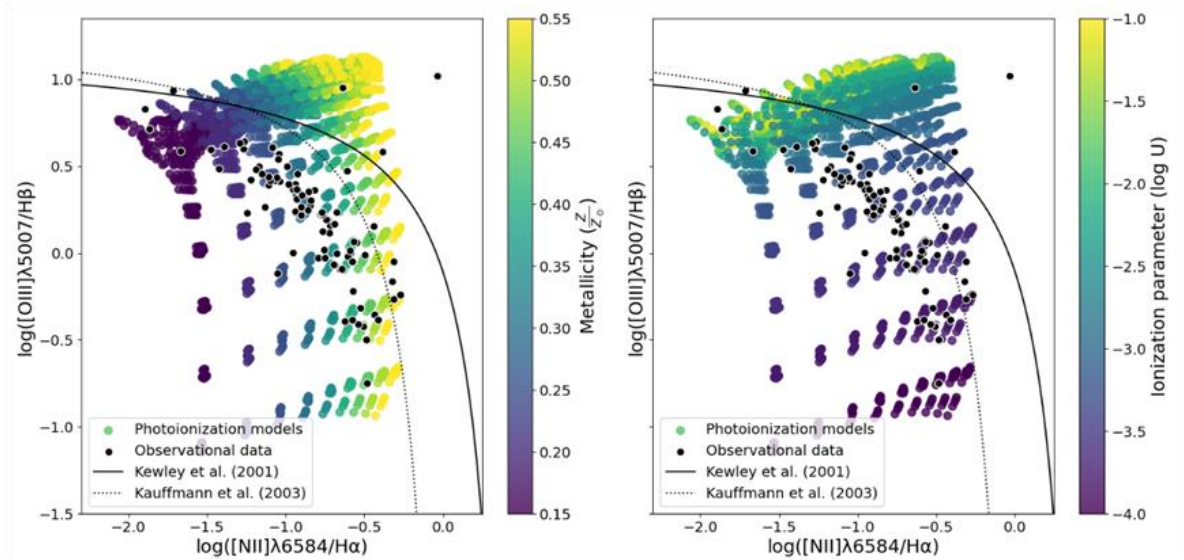
passo de 0,20, visto que Carvalho *et al.* (2020) observaram que valores inferiores a $-1,40$ não reproduzem adequadamente as razões de linhas ópticas em núcleos Seyfert2. Por outro lado, valores próximos a $-1,00$ têm sido consistentemente observados em LINERs e AGNs de baixa luminosidade (YOUNES *et al.*, 2012).

Ao todo, foram gerados 2160 modelos. A estimativa da metalicidade foi baseada na análise conjunta das razões logarítmicas das linhas de emissão $\log([\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ e $\log([\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$. A partir da posição dos objetos no diagrama diagnóstico BPT, foram investigadas as correlações entre esses índices e os parâmetros físicos.

Resultados e Discussão

O diagrama BPT da Figura 1 mostra que a maioria dos objetos da amostra encontra-se abaixo da curva de Kauffmann *et al.* (2003) e apenas quatro objetos estão acima da curva de Kewley *et al.* (2001), sendo assim classificados como AGNs. Sete objetos ocupam a região intermediária entre as duas curvas, sendo classificados como fontes compostas, cuja ionização do gás decorre tanto da formação estelar quanto da atividade nuclear.

Figura 1 – Diagrama BPT com os dados observacionais (pontos em preto) e os modelos de fotoionização. À esquerda, o gradiente de cores indica a metalicidade dos modelos, enquanto que à direita representa o $\log U$. As curvas representam os critérios de Kewley *et al.* (2001) e Kauffmann *et al.* (2003).



Fonte: Os autores

Resultados semelhantes foram obtidos por Birchall *et al.* (2020), que analisaram uma amostra de 53 galáxias anãs e encontraram que apenas oito foram classificadas como AGNs, uma como objeto composto, e as demais como formadoras de estrelas. A baixa fração de AGNs reflete a dificuldade de identificar atividade nuclear em sistemas quimicamente pouco evoluídos. Além disso, galáxias com linhas de emissão fracas (WLGs) frequentemente são excluídas de análises estatísticas por conta da limitação dos métodos tradicionais de classificação. Diagramas diagnósticos BPT exigem, para sua aplicação, a medição de quatro linhas de emissão, o que nem sempre é possível nesses objetos de baixa emissão (STASÍNSKA *et al.*, 2006).

A equação teórica proposta por Kewley *et al.* (2001) é dada por:

$$\log([\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > \frac{0,61}{\log([\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) - 0,47} + 1,19 \quad (1)$$

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

A equação empírica de Kauffmann *et al.* (2003), derivada a partir de observações, define uma fronteira mais restrita para SFs:

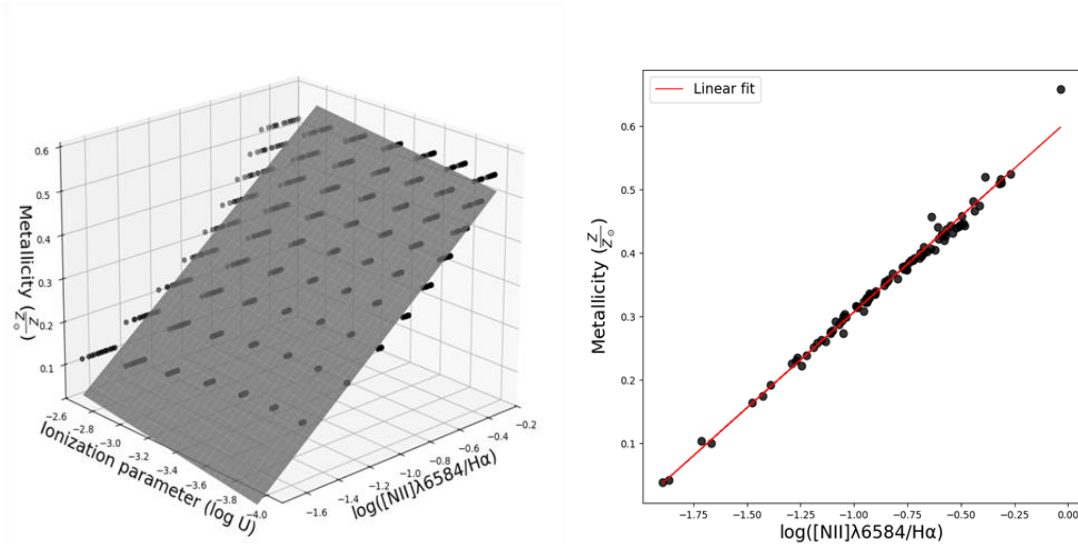
$$\log([OIII]\lambda 5007/H\beta) > \frac{0,61}{\log([NII]\lambda 6584/H\alpha) - 0,05} + 1,30 \quad (2)$$

A Figura 2 (esquerda) apresenta a relação entre a metalicidade, $\log U$ e a razão $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$. A interdependência desses parâmetros sugere que a metalicidade pode ser estimada a partir dessa razão, desde que se considere o efeito do $\log U$, essencial para a interpretação das linhas de emissão. Como discutido por Dopita e Sutherland (2003), o $\log U$ é um dos principais determinantes do espectro de emissão de uma nebulosa, influenciando fortemente a forma global do espectro resultante. A correlação entre $\log([OIII]\lambda 5007/H\beta)$ e o $\log U$ permite estimar este último pela expressão polinomial:

$$\log U = -0,006664 x^3 + 0,2554 x^2 + 0,7197 x - 3,549. \quad (3)$$

Na qual, $x = \log([OIII]\lambda 5007/H\beta)$. Esta relação é válida para $(-4,00 \leq \log U \leq -2,60)$, intervalo no qual os objetos da amostra estão inseridos.

Figura 2 – Relação entre $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$, $\log U$ e a metalicidade (à esquerda) e relação entre $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$ e $Z/Z_{\odot}$ dada pela Equação 4. A linha vermelha indica o ajuste obtido (à direita).



Fonte: Os autores

A metalicidade $Z/Z_{\odot}$ pode ser estimada por:

$$Z/Z_{\odot} = 0,3271 x + 0,0488 y + 0,7942 \quad (4)$$

onde $x = \log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$ e $y = \log U$.

A precisão dessas calibrações foi avaliada comparando os valores estimados com os valores reais dos modelos de fotoionização, apresentando uma diferença média de aproximadamente 0,027 para a metalicidade e 0,10 para o $\log U$, com desvios padrão de 0,033 e 0,13, respectivamente.

A Figura 2 (direita) mostra a relação entre a metalicidade e a razão $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$ obtida a partir dos valores de metalicidade estimados pela Equação 4. A partir desses dados, ajustou-se uma equação linear que relaciona a razão de linhas à metalicidade somente a partir de uma única razão de linhas:

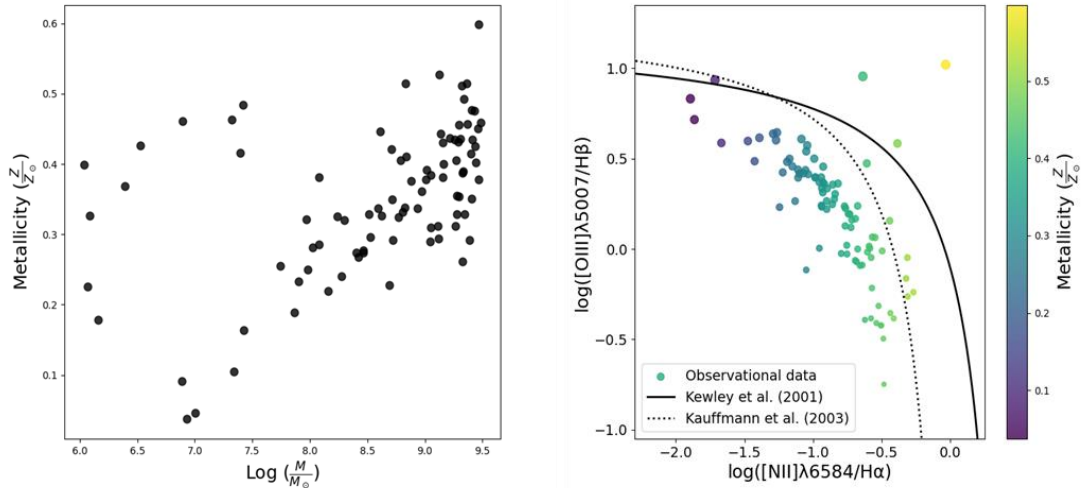
$$Z/Z_{\odot} = 0,3019 x + 0,6089 \quad (5)$$

onde $x = \log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

A relação linear entre a metalicidade e a razão $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$ é uma abordagem recorrente na literatura, aplicável a diferentes amostras observacionais. Pois permite estimativas da metalicidade mesmo quando informações sobre outros parâmetros e linhas de emissão não estão disponíveis.

Figura 3 – Relação entre massa estelar e metalicidade dada pela Equação 5 (à esquerda) e Diagrama BPT (à direita). O gradiente de cores indica a metalicidade e o $\log U$ é indicado pelo tamanho dos pontos.



Fonte: Os autores

A relação massa-metalicidade é apresentada na Figura 3 (esquerda). De acordo com o que é reportado na literatura, galáxias com maiores massas estelares tendem a apresentar metalicidades mais elevadas, uma vez que seus poços gravitacionais mais profundos retêm de forma mais eficiente os elementos metálicos produzidos durante a evolução estelar. Em contrapartida, galáxias de baixa massa apresentam maior suscetibilidade à perda desses elementos, especialmente por meio de ventos galácticos (TREMONTI *et al.*, 2004). Nota-se uma dispersão considerável na região de baixa massa (abaixo de $\sim 10^{7.5} M_{\odot}$). Apesar dessa dispersão, os dados seguem a tendência geral da relação massa-metalicidade, com variações em escala.

O diagrama BPT da Figura 3 (direita) apresenta uma codificação visual que associa a cor dos pontos à metalicidade estimada pela Equação 5, e o tamanho dos pontos ao $\log U$ dado pela Equação 5. Observa-se que os objetos com baixa metalicidade ($Z \lesssim 0,30 Z_{\odot}$) estão concentrados na região esquerda do diagrama, caracterizada por valores baixos de $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$ ($\lesssim -1,25$). Em contraste, na região de transição entre galáxias formadoras de estrelas e AGNs, definida por valores de $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha) \gtrsim -0,50$, predominam objetos com metalicidades mais elevadas ($Z/Z_{\odot} \gtrsim 0,45$).

Adicionalmente, a distribuição do $\log U$ é compatível com o comportamento descrito na literatura. Pontos menores, indicando valores baixos de $\log U$, encontram-se principalmente na parte inferior do diagrama, enquanto pontos maiores, correspondentes a valores mais elevados, ocupam a região superior. Essa distribuição está de acordo com o papel esperado do $\log U$ na determinação da razão $[OIII]\lambda 5007/H\beta$ e, conseqüentemente, na localização dos objetos no diagrama BPT.

Conclusão

Neste estudo, foram analisadas galáxias de baixa massa, combinando modelos de fotoionização gerados com o código CLOUDY e uma amostra observacional de AGNs em galáxias anãs, obtida a partir do cruzamento entre dados do SDSS e do eROSITA. A amostra final ficou composta por 99 objetos. Através da análise de uma extensa grade de 2160 modelos, cobrindo variações em metalicidade, parâmetro de ionização, densidade eletrônica e índice espectral foi possível derivar uma calibração baseada na razão de linhas $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha)$ ajustada pelo parâmetro $\log U$. Essa calibração apresentou boa concordância com os valores simulados, com erros

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

médios baixos, indicando sua aplicabilidade em regimes de baixa metalicidade típicos das galáxias anãs. A distribuição dos objetos no diagrama BPT confirma as tendências esperadas: galáxias com baixa metalicidade concentram-se em regiões de baixo $\log ([\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$, enquanto as de metalicidade mais alta tendem a ocupar a zona de transição entre SFs e AGNs. Além disso, o parâmetro $\log U$ mostrou-se relevante para a formadas linhas de emissão e a localização dos objetos no diagrama. A relação massa-metalicidade obtida acompanha o padrão conhecido na literatura, embora com maior dispersão em baixas massas. Dessa forma, a calibração proposta possibilita a caracterização física e química de AGNs em galáxias de baixa massa, especialmente quando as informações espectroscópicas são limitadas

Referências

- ASPLUND, M. et al. *The Chemical Composition of the Sun. Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 47, p. 481–522, 2009.
- BALDWIN, J. A.; PHILLIPS, M. M.; TERLEVICH, R. *Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 93, p. 5–19, 1981.
- BELLOVARY, J. et al. *The First Massive Black Hole Seeds and Their Hosts. The Astrophysical Journal*, v. 742, p. 13, 2011.
- BIRCHALL, K. L. et al. *X-ray detected AGN in SDSS dwarf galaxies. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 492, p. 2268–2284, 2020.
- BYKOV, E. et al. *SRG/eROSITA catalogue of X-ray active SDSS dwarf galaxies. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 527, n. 2, p. 1962–1981, 2024.
- CARVALHO, S. P. et al. *Chemical abundances of Seyfert 2 AGNs - II. N2 metallicity calibration based on SDSS. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 492, n. 4, p. 5675–5683, 2020.
- DOPITA, M. A.; SUTHERLAND, R. S. *Astrophysics of the Diffuse Universe. [S.l.]: Springer, 2003. (Astronomy and Astrophysics Library). ISBN 978-3-540-43362-2.*
- DORS, O. L. et al. *Oxygen abundance estimations in AGNs: strong-line methods revisited. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 489, p. 1265–1277, 2019.
- DORS O. L., et al. *On the oxygen abundance determination in active galactic nuclei: revisiting the Te method. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 492, p. 4539–4553, 2020.
- FERLAND, G. J. e. a. *CLOUDY C17.01 and later: Numerical Simulation of Plasmas and Their Spectra. 2017. Astrophysics Source Code Library. Ascl:1710.005.*
- HÄGELE, G. F. et al. *Precision abundance analysis of bright HII galaxies. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 383, n. 1, p. 209–229, jan. 2008.
- HIDALGO, S. L. *Mass-metallicity relation of dwarf galaxies and its dependency on time: clues from resolved systems and comparison with massive galaxies. Astronomy & Astrophysics*, v. 606, p. A115, out. 2017.
- KAUFFMANN, G. et al. *The host galaxies of active galactic nuclei. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 346, n. 4, p. 1055–1077, 2003.
- KEWLEY, L. J. et al. *Theoretical Modeling of Starburst Galaxies. The Astrophysical Journal*, v. 556, n. 1, p. 121–140, 2001.
- MAIOLINO, R. et al. *A small and vigorous black hole in the early Universe. Nature*, v. 627, p. 59–63, 2024.
- PRIETO, C. A.; LAMBERT, D. L.; ASPLUND, M. *The Forbidden Abundance of Oxygen in the Sun. The Astrophysical Journal*, v. 556, p. L63–L66, 2001.
- STASIŃSKA, G. et al. *The Environmental Dependence of Stellar Population Properties in the Local Universe. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 371, n. 1, p. 972–982, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10602.x>>.
- STORCHI-BERGMANN, T. et al. *Metallicity Determinations in Active Galactic Nuclei. AJ*, v. 115, p. 909–920, 1998.
- TANANBAUM, H. et al. *X-ray studies of quasars with the einstein observatory. Astrophysical Journal*, v. 234, p. L9–L13, nov. 1979.
- TREMONTI, C. A. et al. *The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. The Astrophysical Journal*, v. 613, p. 898–913, 2004.
- VOLONTERI, M. *Formation of supermassive black holes. The Astronomy and Astrophysics Review*, v. 18, p. 279–315, 2010.
- YOUNES, G. et al. *Study of liner sources with broad H α emission. spectral energy distribution and multiwavelength correlations. Astronomy & Astrophysics*, v. 539, p. A104, 2012.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).