

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP  
Instituto de Pesquisa & Desenvolvimento – IP&D  
Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

Adriano Francisco Monteiro dos Santos  
Orientador: Dr. Oli Luiz Dors Junior

**DETERMINAÇÃO DE ABUNDÂNCIA QUÍMICA DO ARGÔNIO EM AGN TIPO  
SEYFERT 2**

São José dos Campos, SP

2021

ADRIANO FRANCISCO MONTEIRO DOS SANTOS

**DETERMINAÇÃO DE ABUNDÂNCIA QUÍMICA DO ARGÔNIO EM  
AGN TIPO SEYFERT 2**

Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do grau de Doutor em Física e Astronomia.

Orientador: Dr. Oli Luiz Dors Junior

São José dos Campos, SP

2021

## TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

### Ficha catalográfica

Santos, Adriano Francisco Monteiro dos  
Determinação de abundância química do argônio em AGN  
tipo Seyfert 2 / Adriano Francisco Monteiro dos  
Santos; orientador, Oli Luiz Dors Junior. - São  
José dos Campos, SP, 2021.  
1 CD-ROM, 75 p.

Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do  
Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-  
Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Galáxias. 3.  
Galáxias: abundancias. 4. Galáxias: Seyfert 2.  
5. Argônio. I. Dors Junior, Oli Luiz, orient. II.  
Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-  
Graduação em Física e Astronomia. III. Título.

Eu, Adriano Francisco Monteiro dos Santos, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 06 de Março de 2022.

*Adriano Francisco Monteiro dos Santos*

Autor(a) da Obra

Data da defesa: 08 / 12 / 2021

**ADRIANO FRANCISCO MONTEIRO DOS SANTOS**

**“DETERMINAÇÃO DE ABUNDÂNCIA QUÍMICA DO ARGÔNIO EM AGN TIPO Seyfert 2.”**

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF.ª DR.ª ANGELA CRISTINA KRABBE

*Angela Krabbe*

PROF. DR. OLI LUIZ DORS JUNIOR

*Oli Luiz Dors Junior*

PROF. DR. DAVID R. S. G. SOBRAL – Univ. of Lancaster (UK)

*David Sobral*

PROF. DR. JOSÉ EDUARDO TELLES – Observ. Nacional

*José Eduardo Tellez*

PROF. DR. ROGEMAR ANDRÉ RIFFEL - UFSM

*Rogemar A. Riffel*

Prof.ª Dr.ª Lúcia Vieira

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 08 de dezembro de 2021.

*Dedico esse trabalho a minha esposa Adriana,  
aos meus filhos, João Elias e George,  
aos meus pais, Francisco e Raquel.*

## AGRADECIMENTOS

- A Deus, minha maior fortaleza, sem a qual nem eu e nem mais nada existiria.
- À família: minha mãe Raquel, meu pai Francisco, meus irmãos Francisco Júnior e Luciano. Em especial a minha esposa Adriana Ribeiro da Silva, que sempre esteve ao meu lado enfrentando todos os desafios do doutorado.
- Ao Professor Dr. Oli Luiz Dors Junior pela orientação valiosa para o andamento do trabalho. Também à Professora Dra. Ângela Krabbe, que por várias vezes me deu dicas importantes para o desenvolvimento da pesquisa. A todos os funcionários da UNIVAP que me ajudaram direta ou indiretamente no andamento deste Doutorado.
- Aos amigos do Laboratório de Física e Astronomia: Alberto Mesquita, Sarita Carvalho, Celso Júnior, Victor Bonfim, Fredson Conceição e Mark Armah.
- Ao IFMA e meus colegas de trabalho, em especial Emmanuel, Simone, Thiago e Saulo.
- Ao Michael Hanaki por me receber com minha família em São José dos Campos e dar todo apoio possível para nossa chegada na cidade.
- Por fim, à CAPES pela bolsa de estudo, sem a qual essa tese não seria possível. Assim como o Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba por toda estrutura concedida para à realização desse projeto.

## RESUMO

Determinações de abundância de metais em Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs) são essenciais para o estudo da evolução química de galáxias, bem como, do Universo. Atualmente, existem apenas determinações quantitativas da abundância do oxigênio e nitrogênio (em relação ao hidrogênio) em regiões estreitas de AGNs, em particular, em núcleos Seyfert 2. A abundância de outros metais (e.g. Ar, Ne, S, etc.) ainda é pouco conhecida em AGNs. Neste contexto, desenvolvemos uma metodologia para calcular a abundância do argônio em relação a do hidrogênio na região de linhas estreitas de núcleos Seyfert 2. Com esse objetivo, intensidades de linhas de emissão estreitas observadas no espectro óptico ( $3000 \lesssim \lambda(\text{\AA}) \lesssim 7200$ ) de uma amostra de 64 núcleos Seyfert 2 ( $z < 0,25$ ) obtidos do Sloan Digital Sky Survey DR7 e medidas pelo grupo MPA/JHU foram consideradas. Adotamos o método- $T_e$  para AGNs, que é baseado na determinação direta da temperatura eletrônica, juntamente com resultados de uma grade de modelos de fotoionização construídos com o código CLOUDY, para obter um método para a derivação da abundância Ar/H. Nós encontramos que para uma faixa de metalicidade de  $0,2 \lesssim (Z/Z_\odot) \lesssim 2,0$ , núcleos Seyfert 2 apresentam abundância de Ar/H variando de  $\sim 0,1$  a  $\sim 3$  vezes o valor solar de argônio. Os valores de abundância de Ar/H e Ar/O obtidos para a nossa amostra estão em acordo com estimativas de extrapolações dos gradientes de abundância radial para as partes centrais do disco para quatro galáxias espirais. Combinamos nossos resultados de abundância com estimativas obtidas a partir de uma amostra de galáxias H II que foram compiladas da literatura, e encontramos que a razão de abundância Ar/O diminui ligeiramente à medida que a abundância O/H aumenta. Finalmente, propomos uma calibração entre a razão de linhas fortes  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  e Ar/H que fornece valores da abundância do argônio similar aos derivados pelo método- $T_e$ .

**Palavras-chave:** galáxias, galáxias: abundancias, galáxias: Seyfert 2, argônio.

## ABSTRACT

Abundance determinations of metals in Active Galaxy Nuclei (AGNs) are essential for the study of the chemical evolution of galaxies, as well as, of the Universe. Currently, there are only quantitative determinations of the abundance of oxygen and nitrogen (in relation to hydrogen) in AGNs, in particular, in Seyfert 2 nuclei. The abundance of other metals (e.g. Ar, Ne, S, etc.) is poorly known in AGNs. In view of that, the argon abundance relative to hydrogen abundance (Ar/H) in the narrow line region of a sample of Seyfert 2 nuclei is derived in the present work. For that, optical ( $3000 \lesssim \lambda(\text{\AA}) \lesssim 7200$ ) narrow emission line intensities of a sample of 64 local Seyfert 2 nuclei ( $z < 0.25$ ) taken from Sloan Digital Sky Survey DR7 and measured by the MPA/JHU group were considered. We adopted the  $T_e$ -method for AGNs, which is based on direct determination of the electron temperature, together with a grid of photoionization model results, built with the Cloudy code, to obtain a method for the derivation of the Ar/H abundance. We find that for a metallicity range of  $0.2 \lesssim (Z/Z_\odot) \lesssim 2.0$ , Seyfert 2 nuclei present Ar/H abundance ranging from  $\sim 0.1$  to  $\sim 3$  times the argon solar value. The range of Ar/H and Ar/O abundance values obtained from our sample are in consonance with estimations from extrapolations of the radial abundance gradients to the central parts of the disk for four spiral galaxies. We combined our abundance results with estimates obtained from a sample of H II galaxies, which were taken from the literature, and found that the Ar/O abundance ratio decreases slightly as the O/H abundance increases. Finally, we propose a calibration between the strong  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  line ratio and Ar/H abundance that produces similar argon abundance values to those derived through the  $T_e$ -method.

**Keywords:** galaxies, galaxies: abundances, galaxies: Seyfert 2, argon.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo unificado de AGN . . . . .	14
Figura 2 – Espectros típicos de núcleos Seyfert 1 e Seyfert 2 . . . . .	14
Figura 3 – Razão de abundância Ar/O versus a abundância total do oxigênio em Galáxias com formação de estrelas . . . . .	19
Figura 4 – Gradiente de O/H na galáxia em espiral M 101 . . . . .	22
Figura 5 – Diagrama diagnóstico $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$ versus $\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ para a amostra . . . . .	28
Figura 6 – Histograma da distribuição de valores de densidade eletrônica da amostra	29
Figura 7 – Efeito de abertura na amostra . . . . .	33
Figura 8 – Valores de temperatura para $\text{S}^2$ , $\text{Ar}^2$ e $\text{O}^2$ . . . . .	36
Figura 9 – Valores de temperatura para $\text{Ar}^2$ versus $t_3$ . . . . .	37
Figura 10 – ICF para $\text{Ar}^{2+}$ versus a razão de abundância $x = [\text{O}^{2+}/(\text{O}^+ + \text{O}^{2+})]$ . .	39
Figura 11 – Calibração bi-paramétrica entre $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+})$ , $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ e $x = [\text{O}^{2+}/(\text{O}^+ + \text{O}^{2+})]$ . . . . .	40
Figura 12 – Distribuição de valores de ICF para o argônio . . . . .	45
Figura 13 – Abundância total de argônio versus a abundância total de oxigênio . .	47
Figura 14 – Distribuição da abundância de argônio para a amostra de núcleos Seyfert 2	49
Figura 15 – Comparação entre as abundâncias de argônio em relação aos valores solares . . . . .	51
Figura 16 – Relação entre $\log(\text{Ar}/\text{O})$ e $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ . . . . .	52
Figura 17 – Histograma da distribuição do índice espectral $\alpha_{\text{ox}}$ derivado por Miller <i>et al.</i> . . . . .	56
Figura 18 – $\log([\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha)$ versus $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ para modelos assumindo $\alpha_{\text{ox}} = -0,8$ . . . . .	58
Figura 19 – $\log([\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha)$ versus $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ para modelos assumindo $\alpha_{\text{ox}} = -1,1$ . . . . .	59
Figura 20 – $\log(12 + \log(\text{Ar}/\text{H}))$ versus $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha)$ . . . . .	60
Figura 21 – Comparação dos resultados obtidos pelo método-Te e método de linhas fortes . . . . .	61
Figura 22 – Relação entre $\log(\text{Ar}/\text{O})$ e $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ pelo método de linhas fortes .	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos . . . . .	41
Tabela 2 – Valores das razões de abundância derivados pelo método $T_e$ adaptado para AGNs . . . . .	49
Tabela 3 – Parâmetros de gradiente de abundância radial derivados para as razões de abundância de Ar/H e Ar/O em uma amostra de galáxias espirais . . . . .	50
Tabela 4 – Coeficientes dos ajustes lineares . . . . .	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGN	- <i>Active Galactic Nuclei</i> ou, em português, Núcleos ativos de galáxias
BLR	- <i>Broad-line region</i> ou, em português, Região de linhas largas
FWHM	- <i>Full Width at Half Maximum</i> ou, em português, Largura à meia altura
ICF	- <i>Ionization Correction Factor</i> ou, em português, Fator de correção de ionização
IMF	- <i>Initial Mass Function</i> ou, em português, Função de massa inicial
$N_e$	- Densidade eletrônica
NLR	- <i>Narrow-line region</i> ou, em português, Região de linhas estreitas
SED	- <i>Spectral Energy Distribution</i> ou, em português, Distribuição de energia espectral
SF	- <i>Star-forming</i> ou, em português, Formação de estrelas
SMBH	- <i>Super Massive Black Hole</i> ou, em português, Buraco Negro Super Massivo
$T_e$	- Temperatura eletrônica
$U$	- Parâmetro de ionização
$Z$	- Metalicidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Histórico sobre Núcleos Ativos de Galáxias</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Modelo unificado</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Cálculo da abundância química de metais</b>	<b>15</b>
1.3.1	Método- $T_e$	17
1.3.2	Método de linhas fortes	20
1.3.3	Extrapolação de gradientes de abundância	21
<b>1.4</b>	<b>Motivação</b>	<b>21</b>
<b>1.5</b>	<b>Objetivos</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>ESTIMATIVAS DE ABUNDÂNCIA DE ARGÔNIO EM NÚCLEOS DE GALÁXIAS TIPO SEYFERT 2</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>Histórico de estimativas de abundâncias em AGNs</b>	<b>24</b>
<b>2.2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>27</b>
2.2.1	Dados Observacionais	27
2.2.1.1	Seleção da amostra	29
2.2.1.2	Efeitos de abertura	31
2.2.2	Método- $T_e$	32
2.2.2.1	Abundância do oxigênio	32
2.2.2.2	Abundância do argônio	35
2.2.2.2.1	ICF para $Ar^{2+}$	38
<b>2.3</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>DETERMINAÇÃO DE ABUNDÂNCIA QUÍMICA DO ARGÔNIO POR LINHAS FORTES</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia</b>	<b>53</b>
3.1.1	Determinação do parâmetro de ionização	54
3.1.2	Modelos de fotoionização	55
<b>3.2</b>	<b>Resultados e discussão</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Observações realizadas nas últimas décadas têm apresentado evidências de que no centro da maioria das galáxias existe a presença de um Buraco Negro Supermassivo (*Super Massive Black Hole*, doravante SMBH), com massa da ordem de  $10^6$  a  $10^8 M_{\odot}$  (e.g. [SANCHEZ et al. 2017](#)). O núcleo de galáxias que possuem SMBH e este está acretando gás são denominados Núcleos Ativos de Galáxias (*Active Galactic Nuclei*, doravante AGN). AGNs apresentam luminosidade bolométrica ( $L_{bol}$ ) típica da ordem de  $10^{46}$  erg s $^{-1}$  ( $\sim 10^{12} L_{\odot}$ ), com um fluxo de radiação de origem não estelar muito mais intenso, em praticamente todas as faixas espectrais, em comparação ao de núcleos de galáxias que possuem apenas formação estelar. Este fluxo de radiação proveniente de um AGN pode ser até mesmo superior ao da galáxia que o contém, como é o caso dos quasares, uma classe de AGN.

Essa intensa fonte de radiação é gerada devido à presença de matéria interestelar sendo acretada pelo buraco negro central, isto é, a energia é liberada pela matéria caindo em movimento circular no SMBH ([OSTERBROCK; FERLAND, 2006](#)).

### 1.1 Histórico sobre Núcleos Ativos de Galáxias

As primeiras observações de AGNs foram executadas por [Fath](#) (1909) e mostraram que espectros de algumas galáxias espirais são semelhantes aos de estrelas, porém, com a presença de linhas de emissão sobrepostas ao contínuo, similares aos espectros de nebulosas planetárias. Nesta época, nenhuma conclusão sobre a natureza desses objetos foi obtida. Outras observações, feitas por [Seyfert](#) (1943), mostraram que os espectros do núcleos de alguns objetos definidos por nebulosas extragaláticas, localizados no centro de galáxias, possuíam alta luminosidade e apresentavam linhas de recombinação do hidrogênio largas em comparação as de nebulosas planetárias, com larguras de até 8500 km/s. No entanto, a causa deste alargamento não era conhecida. Uma explicação para a alta luminosidade medida em classes de galáxias como as observadas por [Seyfert](#) (1943) foi teorizada por [Salpeter](#) (1964), quem propôs que a alta luminosidade poderia ser devido a existência de matéria interestelar sendo acretada por objetos massivos, com massas  $M \gtrsim 10^6 M_{\odot}$ . Neste período, observações de objetos compactos, muito distantes e com um brilho extremamente alto, denominados por quasares (*quasi-stellar objects*), indicavam existir no seu interior um núcleo muito massivo com um raio relativamente pequeno. Baseando-se no trabalho de [Salpeter](#) (1964), [Lynden-Bell e Rees](#) (1971) mostraram que a acreção de matéria pode ser, também, o mecanismo das fontes de raios X, de rádio e da luz visível observada em quasares.

Com avanços nas técnicas de observações, as evidências de que existe uma concentração de massa muito alta no centro das galáxias foram se tornando maiores. [Sargent et al.](#) (1978) observaram estrelas movendo-se com velocidades extremamente altas no centro da galáxia M 87. Estes autores estimaram que estas estrelas orbitavam em torno de um objeto com massa bilhões de vezes a massa do Sol. Também usando velocidade de rotação das estrelas, [Dressler](#) (1984) estimou que a massa do centro de NGC 224 (galáxia denominada por Andrômeda) era da ordem de 10 milhões de vezes a massa do Sol. Posteriormente, [Kormendy](#) (1988) estimou que a massa no centro da galáxia NGC 4594 (galáxia denominada por Sombbrero) era da ordem de  $10^6 M_{\odot}$ . Com uso de dados do Satélite Espacial Hubble, lançado em abril de 1990, [Harms et al.](#) (1994) encontraram que o núcleo de M 87 possui massa de  $\sim 2,4 \times 10^6 M_{\odot}$  concentrado em uma região de aproximadamente 20 pc, espaço considerado muito pequeno para conter um aglomerado estelar com o valor de massa supracitado, concluindo que o núcleo deveria se tratar de um SMBH.

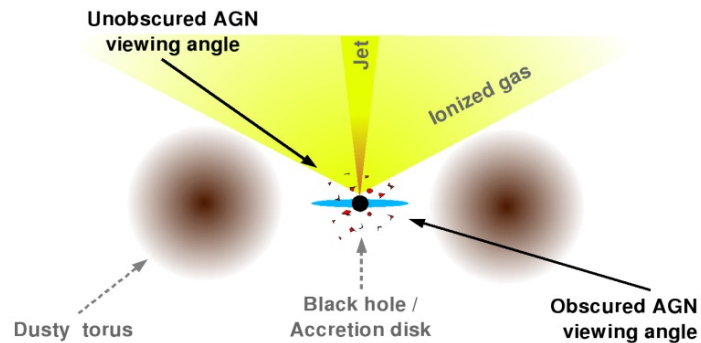
Embora buracos negros não emitam radiação eletromagnética e, portanto, não são detectados diretamente por telescópios, a primeira imagem da sombra do buraco negro e do gás ionizado ao seu redor foi obtida recentemente por [Akiyama et al.](#) (2019), no caso para a galáxia com núcleo ativo M 87. Esta imagem foi obtida utilizando uma técnica sofisticada que combina dados de múltiplos radiotelescópios (interferometria) e o experimento foi chamado de *Event Horizon Telescope*.

## 1.2 Modelo unificado

O modelo unificado visa explicar as principais propriedades apresentadas por várias classes de AGN considerando um único tipo de objeto. Inicialmente proposto por [Antonucci](#) (1993), o modelo é composto por um SMBH na região central, um disco de acreção, jatos relativísticos, uma região de linhas largas (do inglês, *broad line region* ou BLR) situada na região do raio menor do disco de acreção, de um toro constituído de poeira que obscurece o local em torno da região de linhas largas (aproximadamente a 1 parsec do buraco negro) e uma região de linhas estreitas (do inglês, *narrow line region* ou NLR) situada em um raio maior do disco de acreção, como apresentado na Figura 1.

[Heckman e Best](#) (2014) apresentaram uma revisão do modelo unificado proposto por [Antonucci](#) (1993) explicando diversas classificações de AGN. No foco dessa tese estão os AGNs classificados como Seyfert, particularmente os tipo 2. Esta classificação depende da largura de seus perfis de linha de emissão permitidas, no sentido que os Seyfert tipo 1 possuem linhas de Balmer largas (largura a meia altura, do inglês, *full width at half maximum*  $FWHM \gtrsim 1000$  km/s) e Seyfert tipo 2 linhas estreitas ( $FWHM \lesssim 1000$  km/s). Na Figura 2, são apresentado exemplos de espectros de Seyfert 1 e 2 onde, claramente, pode-se notar diferenças nas larguras das linhas permitidas (e.g.  $H\beta$ ) em cada tipo de

Figura 1 – Modelo unificado de AGN

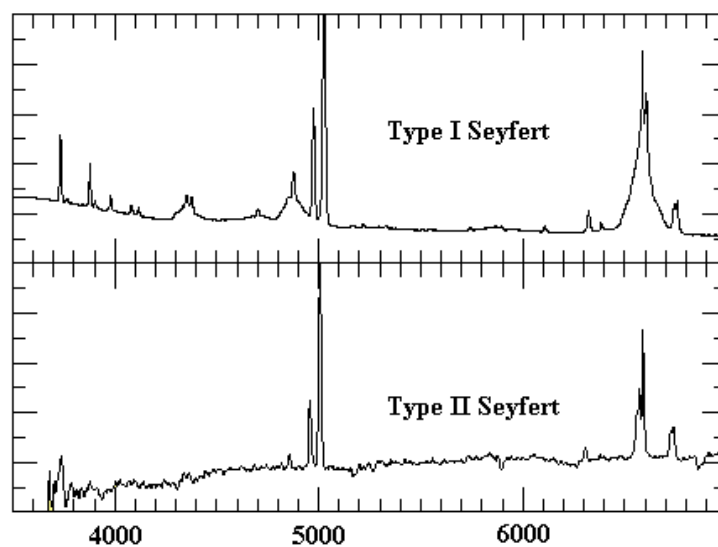


Fonte: Gandhi (2005)

objeto.

O alargamento de uma linha é causado principalmente pelo movimento do íon que a emite ou, em um outro sentido, devido ao movimento perturbado do gás que o contém (FERLAND *et al.*, 2013). O termo perturbado refere-se a um movimento que não pode ser descrito completamente pelo formalismo de um gás em equilíbrio térmico, e.g., pela distribuição de Maxwell-Boltzmann. Em outras palavras, parte do alargamento é devido a temperatura do gás, mas, na sua maioria, é devido à perturbação deste (e.g. choque de gás ionizado com altas velocidades). As galáxias Seyfert podem também ser categorizadas em tipos intermediários (e.g. tipo 1,5) dependendo da relação entre as componentes de emissão de linhas estreitas e linhas largas.

Figura 2 – Painel superior: espectro típico de um núcleo Seyfert tipo 1, caracterizado por linhas permitidas largas e linhas proibidas estreitas. Painel inferior: espectro típico de um núcleo Seyfert tipo 2, caracterizado por linhas permitidas e proibidas estreitas.



Fonte: <http://www.uni.edu/morgans/astro/course/Notes/section3/new13.html>

Considerando o Modelo Unificado representado na Figura 1, se observarmos a radiação proveniente de uma AGN cuja linha de visada é *edge-on* (lado), o toro obscurece a radiação emitida pelo disco de acreção e este objeto é classificado como Seyfert tipo 2 e neste caso observamos a NLR. Quando visualizado pela posição *face-on* (topo), a parte central (buraco negro) pode ser observado mais diretamente, tendo assim as galáxias Seyfert tipo 1 e assim observamos a BLR.

### 1.3 Cálculo da abundância química de metais

Em astrofísica o termo metais refere-se a todos os elementos com massa atômica maior que a massa do que o hélio, i.e., O, N, Ar, Ne, etc. A metalicidade ( $Z$ ) é definida pela abundância de todos os metais (em número de átomos) relativo ao número de átomos de hidrogênio, ou seja:

$$Z = (\text{O}/\text{H}) + (\text{N}/\text{H}) + (\text{S}/\text{H}) + (\text{Ar}/\text{H}) + \dots \quad (1)$$

No estudo de nebulosas gasosas, geralmente, a metalicidade é parametrizada em termos da metalicidade solar, definida por  $Z_{\odot}$ . Pode-se encontrar na literatura a terminologia  $Z_{\odot} = 0,02$ , sendo a metalicidade de um determinado objeto dado em relação a este valor, por exemplo, um objeto com  $Z = 0,008$  possui metalicidade  $Z = Z_{\odot}/4$ . O número 0,02 refere-se que 2% dos elementos neste objeto são metais.

Devido ao oxigênio ser o elemento mais abundante depois do hidrogênio e do hélio e com linhas de emissão dos estágios de ionização mais abundantes ( $\text{O}^+$  e  $\text{O}^{2+}$ ) facilmente medidas no espectro ótico ( $[\text{O II}]\lambda 3726 + \lambda 3729$ ,  $[\text{O III}]\lambda 5007$ ), a metalicidade é, frequentemente, expressa em termos de sua abundância e é definida por

$$Z \equiv 12 + \log(\text{O}/\text{H}). \quad (2)$$

Esta definição ou aproximação é utilizada tanto em estudos de regiões de formação estelar (e.g., TREMONTI *et al.*, 2004; NAGAO; MAIOLINO; MARCONI, 2006a; THUAN; PILYUGIN; ZINCHENKO, 2010) como em estudos de AGNs (e.g., STORCHI-BERGMANN *et al.*, 1998; GROVES; HECKMAN; KAUFFMANN, 2006). O oxigênio também é importante no estudo de nebulosas gasosas pois:

- é o principal agente refrigerante devido à diferença entre seus níveis de energia serem da ordem de  $kT$  (sendo  $k$  a constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura eletrônica);
- é um elemento originado da nucleossíntese estelar primária, isto é, diretamente da fusão do H e He.

Como um fator negativo, o oxigênio pode se combinar com outros elementos na formação de poeira. Logo, a abundância total de oxigênio deve ser a abundância deste no gás somada

a sua abundância existente em poeira (difícil de estimar). Por exemplo, [Pilyugin, Thuan e Vílchez \(2007\)](#) assumiram que a fração de oxigênio contido no interior de grãos de poeira em regiões H II é aproximadamente 0,08 dex. No caso da NLRs de AGN, [Nagao, Maiolino e Marconi \(2006b\)](#) sugeriram que estas regiões são livres de poeira, o que pode não ser o mesmo para BLRs.

A análise de metalicidade em AGNs e regiões de formação de estrelas fornece informações sobre os processo de formação e crescimento das galáxias e, também, da evolução química do Universo. A composição química de uma galáxia pode ser obtida a partir da intensidade de linhas de emissões de metais presentes em seus espectros por diferentes métodos, tais como, por meio de linhas de recombinação, linhas sensíveis à temperatura eletrônica (método direto) e pelo uso de linhas de emissões fortes, facilmente observáveis (método indireto). Além destes métodos, a metalicidade em núcleos de galáxias em espirais pode ser inferida a partir da extrapolação do gradiente de abundância a regiões centrais do disco (ver [ZINCHENKO \*et al.\* 2019](#) e referências listadas neste artigo). Dois artigos de revisão sobre cálculos de metalicidade foram publicados por [Maiolino e Mannucci \(2019\)](#) e por [Kewley, Nicholls e Sutherland \(2019\)](#).

Determinações de abundância de outros elementos, tais como N, S, Ar, são mais difíceis em comparação a do oxigênio devido à falta de linhas de emissão dos íons mais abundantes destes elementos em uma mesma faixa espectral. Por exemplo, o nitrogênio possui apenas linhas de emissão do íon  $N^+$  no espectro ótico, isto é, as linhas  $[N\text{ II}]\lambda 6548$  e  $\lambda 6584$  Å. Entretanto, linhas emitidas por íons de nitrogênio em maiores estados de ionização são observadas em outras faixas de comprimento de onda, por exemplo,  $N\text{ V}\lambda 1240$  Å. Logo, obviamente, a suposição que a abundância total do nitrogênio pode ser calculada por

$$\frac{N}{H} = \frac{N^+}{H^+} \quad (3)$$

conduz a subestimar a abundância do nitrogênio.

No caso do argônio, elemento de estudo do presente trabalho, na faixa espectral do ótico ( $3000 < \lambda(\text{Å}) < 8000$ ), existem as linhas de emissão  $[\text{Ar IV}]\lambda 4740$ ,  $[\text{Ar III}]\lambda 5192$ ,  $[\text{Ar V}]\lambda 7006$ ,  $[\text{Ar III}]\lambda 7135$ , e  $[\text{Ar III}]\lambda 7750$ . Entretanto, estas linhas são somente observadas em objetos cujo o gás possui alta excitação, por exemplo, no espectro da Seyfert 2 ESO 138 G1 (ver [ALLOIN \*et al.\*, 1992](#)). Na maior parte dos casos, somente a linha  $[\text{Ar III}]\lambda 7135$  é observada. O cálculo da abundância total de metais utilizando o método direto (veja abaixo) exige o uso de Fatores de Correção de Ionização (*Ionization Correction Factor* ou ICF), proposto por [Peimbert e Costero \(1969\)](#), a fim de considerar no cálculo a abundância de estágios de ionização de elementos superiores ou inferiores aos dos que somente observamos as linhas. Para regiões H II existem vários ICFs propostos na literatura para diversos metais (por exemplo, ver [DORS \*et al.\*, 2013, 2016](#)). Entretanto, no caso de AGNs, existe somente o ICF para o neônio proposto recentemente por [Armah \*et al.\* \(2021\)](#).

### 1.3.1 Método- $T_e$

O método considerado mais confiável na determinação da abundância química de metais é o método direto ou método- $T_e$ . Este método consiste, basicamente, em medir a intensidade de uma linha de emissão do íon para o qual se quer determinar a abundância e determinar valores representativos da densidade eletrônica ( $N_e$ ) e temperatura eletrônica ( $T_e$ ) da região do gás onde se encontra este íon. Os espectros de gases ionizados em condições astrofísicas são ricos em linhas excitadas colisionalmente. O fluxo de uma linha de emissão é proporcional à abundância do elemento como também da sua emissividade, que depende tanto da temperatura eletrônica quanto da densidade eletrônica. No caso de linhas excitadas colisionalmente, a intensidade destas possuem uma maior dependência com a temperatura ( $\sim e^{-1/T_e}$ ) em comparação a linhas de recombinação (OSTERBROCK; FERLAND, 2006).

A densidade eletrônica é medida, usualmente, pela razão de linhas do enxofre [S II] $\lambda$ 6716/ $\lambda$ 6731, enquanto a temperatura eletrônica pode ser medida pelas linhas “aurorais”, isto é, linhas formadas pela transição eletrônica entre níveis quânticos com grandes diferenças de energia, nas quais a excitação é muito sensível à temperatura, por exemplo, a razão de linhas [O III]( $\lambda$ 4959 +  $\lambda$ 5007)/ $\lambda$ 4363. Uma vez que estes dois parâmetros são medidos, a abundância iônica pode ser obtida de relações baseadas em modelos atômicos (OSTERBROCK; FERLAND, 2006). Existem alguns códigos específicos para derivar a temperatura como, por exemplo, o PYNEB (LURIDIANA et al., 2012, 2015), uma versão em linguagem Python da rotina STSDAS NEBULAR do IRAF <sup>1</sup>. Um tutorial para usar este método foi recentemente publicado por Peimbert, Peimbert e Delgado-Inglada (2017) e por Pérez-Montero (2017).

A utilização do método- $T_e$  é limitada pela natureza fraca das linhas aurorais. De fato, a linha [O III] $\lambda$ 4363 é aproximadamente 100 vezes mais fraca que a linha H $\beta$  e, na maior parte dos casos, somente medida em objetos com baixa metalicidade e/ou alta excitação. No que segue, apresentamos o formalismo do método- $T_e$  baseado em Izotov *et al.* (2006) e Hägele *et al.* (2008) para calcular a abundância do oxigênio e do argônio.

Primeiramente, a temperatura eletrônica da região de alta ionização, onde encontra-se o íon O<sup>2+</sup>, referida por  $t_3$ , é calculada por

$$t_3 = 0.8254 - 0.0002415R_{O3} + \frac{47.77}{R_{O3}}, \quad (4)$$

sendo  $t_3$  em unidades de  $10^4$  K e  $R_{O3}=[\text{O III}](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ . A temperatura eletrônica da região de baixa excitação, onde encontra-se o íon O<sup>+</sup>, referida por  $t_2$ , é

<sup>1</sup> *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF), que consiste em um software escrito pela *National Optical Astronomy Observatory* (NOAO) para redução de dados e imagens astronômicas. A rotina NEBULAR do pacote STSDAS (*Space Telescope Science Data Analysis System*) é utilizada para calcular condições físicas de gases utilizando razões de linhas.

calculada pela relação teórica (obtida utilizando resultados de modelos de fotoionização) com  $t_2$ ,

$$t_2^{-1} = 0.693 t_3^{-1} + 0.281, \quad (5)$$

isso para os casos que não podemos calcular diretamente  $t_2$  a partir da razão de linhas  $[\text{O II}]\lambda 3726,29/\lambda 7330$ . Esta relação é válida para regiões H II. Quando a razão de linhas  $R_{\text{O2}} = [\text{O II}](\lambda 3726 + 3729)/7330$  é medida,  $t_2$  pode ser diretamente derivada pela expressão

$$t_2 = 0.23 + 0.0017 R_{\text{O2}} + \frac{38.3}{R_{\text{O2}}}. \quad (6)$$

As abundâncias de  $\text{O}^{2+}$  and  $\text{O}^+$  em relação a  $\text{H}^+$  são obtidas por:

$$12 + \log\left(\frac{\text{O}^{2+}}{\text{H}^+}\right) = \log\left(\frac{I(4959) + I(5007)}{I(\text{H}\beta)}\right) + 6.144 \\ + \frac{1.251}{t_3} - 0.55 \log t_3 \quad (7)$$

e

$$12 + \log\left(\frac{\text{O}^+}{\text{H}^+}\right) = \log\left(\frac{I(3727)}{I(\text{H}\beta)}\right) + 5.992 \\ + \frac{1.583}{t_2} - 0.681 \log t_2 + \log(1 + 2.3n_e), \quad (8)$$

sendo  $n_e$  a densidade eletrônica  $N_e$  em unidades de  $10\,000 \text{ cm}^{-3}$ .

Finalmente, a abundância total do oxigênio é calculada por

$$\frac{\text{O}}{\text{H}} = \frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} + \frac{\text{O}^{2+}}{\text{H}^+}. \quad (9)$$

Para o argônio temos:

$$12 + \log\left(\frac{\text{Ar}^{2+}}{\text{H}^+}\right) = \log\left(\frac{I(7135)}{I(\text{H}\beta)}\right) + 6.174 \\ + \frac{0.799}{t_3} - 0.48 \log t_2 + \log(1 + 0.22n_e), \quad (10)$$

e

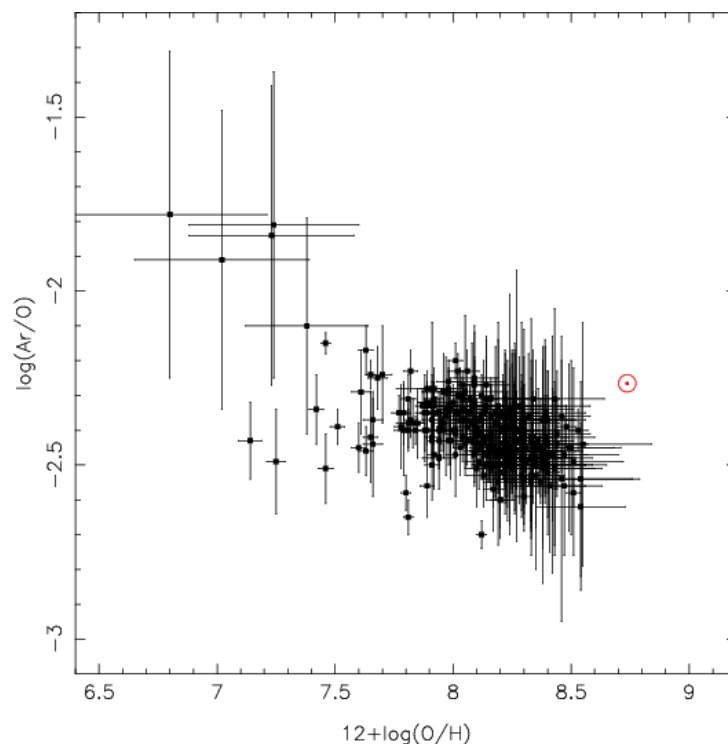
$$12 + \log\left(\frac{\text{Ar}^{3+}}{\text{H}^+}\right) = \log\left(\frac{I(4740)}{I(\text{H}\beta)}\right) + 6.308 \\ + \frac{1.298}{t_3} - 0.48 \log t_3. \quad (11)$$

A abundância total do argônio é calculada por

$$\frac{\text{Ar}}{\text{H}} = \text{ICF}(\text{Ar}) \times \left( \frac{\text{Ar}^{2+}}{\text{H}^+} + \frac{\text{Ar}^{3+}}{\text{H}^+} \right), \quad (12)$$

sendo que  $\text{ICF}(\text{Ar})$  somente é disponível na literatura para regiões H II (ver [IZOTOV \*et al.\* 2006](#)). Na Figura 3, é mostrado os valores do logaritmo da razão de abundância Ar/O versus a abundância total do oxigênio [em unidades de  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ ] calculados com o método direto por [Izotov \*et al.\* \(2006\)](#) para uma amostra de 310 galáxias com formação estelar. Os dados observacionais utilizados por [Izotov \*et al.\* \(2006\)](#) foram obtidos do Sloan Digital Sky Survey ([YORK \*et al.\*, 2000](#)). Valores da abundância solar, obtidos de [Grevesse e Sauval \(1998\)](#) e [Prieto, Lambert e Asplund \(2001\)](#) também são mostrados na Figura 3. Podemos notar que o valor máximo da abundância de oxigênio é aproximadamente 8.6 dex. Este valor não representa o maior valor de abundância encontrado em galáxias com formação estelar (8.95 dex, [PILYUGIN; THUAN; VÍLCHEZ 2007](#)), mas sim, aproximadamente, o limite da derivação de abundância do método direto para esta classe de objetos.

Figura 3 – Razão de abundância Ar/O versus a abundância total do oxigênio [em unidades de  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ ] calculados com o método direto por [Izotov \*et al.\* \(2006\)](#) para uma amostra de 310 galáxias com formação estelar. Abundância solar obtida por [Prieto, Lambert e Asplund \(2001\)](#) e [Grevesse e Sauval \(1998\)](#) é indicada em vermelho.



Fonte: [Izotov \*et al.\* \(2006\)](#)

Até o momento, o método- $T_e$  foi utilizado para determinar a abundância do oxigênio ([ALLOIN \*et al.\* 1992](#); [IZOTOV; THUAN 2008](#); [REVALSKI \*et al.\* 2018a, 2018b](#);

DORS *et al.* 2020a,2020b; FLURY; MORAN 2020), neônio (ARMAH *et al.*, 2021) e nitrogênio (FLURY; MORAN, 2020) somente em AGNs tipo Seyfert 2 no universo local ( $z < 0.4$ ). A abundância do enxofre foi estimada de forma qualitativa por Storchi-Bergmann e Pastoriza (1990) comparando, em um diagrama  $[\text{N II}](\lambda\lambda 6548,6584)/\text{H}\alpha$  versus  $[\text{S II}]\lambda\lambda(6716,31)/\text{H}\alpha$ , resultados de modelos de fotoionização com dados observacionais de 177 núcleos Seyfert 2. Estas autoras encontraram que os dados somente podem ser reproduzidos por modelos que consideram abundâncias de enxofre variando de 0,5 a 4 vezes o valor solar  $[12 + \log(\text{S}/\text{H})_{\odot} = 7.26]$ .

### 1.3.2 Método de linhas fortes

<sup>2</sup>Como reportado anteriormente, a linha  $[\text{O III}]\lambda 4363$ , assim como outras linhas sensíveis a  $T_e$  (e.g.  $[\text{S III}]\lambda 6312$ ,  $[\text{N II}]\lambda 5755$ ) são fracas e de difícil detecção em espectros de regiões H II e AGNs. Além desse fato,  $[\text{O III}]\lambda 4363$  pode estar sobreposta a linha  $\text{H}\gamma$   $\lambda 4340$ , exigindo uma alta resolução espectral para ser medida. Com o objetivo de estimar a abundância do oxigênio em regiões H II, Pagel *et al.* (1979) propuseram um método alternativo, chamado de método de linhas fortes. Este método, basicamente, consiste em estimar a abundância de O/H medindo somente a razão de linhas fortes

$$R_{23} = \frac{[\text{O II}]\lambda 3727 + [\text{O III}]\lambda 4959 + \lambda 5007}{\text{H}\beta}, \quad (13)$$

sendo  $[\text{O II}]\lambda 3727 = [\text{O II}]\lambda 3726 + \lambda 3729$ .

Considerando as equações 7 e 8 temos que as razões

$$\frac{[\text{O II}]\lambda 3727}{\text{H}\beta} \sim \frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} \quad (14)$$

e

$$\frac{[\text{O III}]\lambda 4959, \lambda 5007}{\text{H}\beta} \sim \frac{\text{O}^{2+}}{\text{H}^+}. \quad (15)$$

Logo

$$R_{23} \sim \frac{\text{O}}{\text{H}} \sim Z. \quad (16)$$

Algumas outras razões de linhas foram sugeridas como indicadores de metalicidade como, por exemplo,  $N2 = \log[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$  (STORCHI-BERGMANN; CALZETTI; KINNEY, 1994), entre outras (ver DORS *et al.*, 2013). Após o trabalho pioneiro de Pagel *et al.* (1979), vários autores propuseram distintas calibrações empíricas (baseadas em estimativas de O/H via método- $T_e$ ) e teóricas (baseadas em estimativas de O/H via modelos de fotoionização). Em relação a AGNs, podemos citar a primeira calibração (teórica) utilizando linhas observadas no óptico e emitidas por NLRs proposta por Storchi-Bergmann *et al.* (1998),

<sup>2</sup> Esta Seção é baseada nas teses de Claudio Castro e Sarita Carvalho.

semiempíricas propostas por [Castro \*et al.\* \(2017\)](#) e [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#). Recentemente, [Dors \(2021\)](#) propôs a primeira calibração empírica para AGNs. Calibrações utilizando linhas emitidas por NLRs mas observadas no ultravioleta foram propostas por [Dors et al. \(2014, 2019\)](#). A determinação da abundância de outros metais por linhas fortes não é direta como a do oxigênio, como veremos no Capítulo 3.

### 1.3.3 Extrapolação de gradientes de abundância

Este método consiste em inferir ao núcleo de uma galáxia espiral um valor da abundância química de um certo elemento sem medir as linhas emitidas por este núcleo, considerando o gradiente radial de abundância química existente no disco da galáxia que contém esse núcleo.

Em geral, todas as galáxias espirais apresentam um decréscimo da abundância de metais à medida que consideramos maiores distâncias do núcleo. Desta forma, se determinarmos a abundância de elementos químicos em regiões H II ao longo do disco iremos encontrar um gradiente radial. A extrapolação deste gradiente à distância galactrocêntrica zero produzirá um valor de abundância ao núcleo. Isso é correto se considerarmos que o núcleo e o disco possuem uma evolução química semelhante.

Como um exemplo da utilização deste método, na Figura 4 o gradiente de O/H na galáxia em espiral M 101 obtido por [Kennicutt, Bresolin e Garnett \(2003\)](#) é mostrado. Cada ponto representa o valor da abundância de  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ , obtido utilizando o método- $T_e$ , de uma região H II localizada a uma distância  $R/R_0$ , sendo  $R_0=32.4$  kpc o raio isofotal. Estes autores ajustaram uma reta aos pontos e encontraram

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.76(\pm 0.06) - 0.90(\pm 0.08) R/R_0. \quad (17)$$

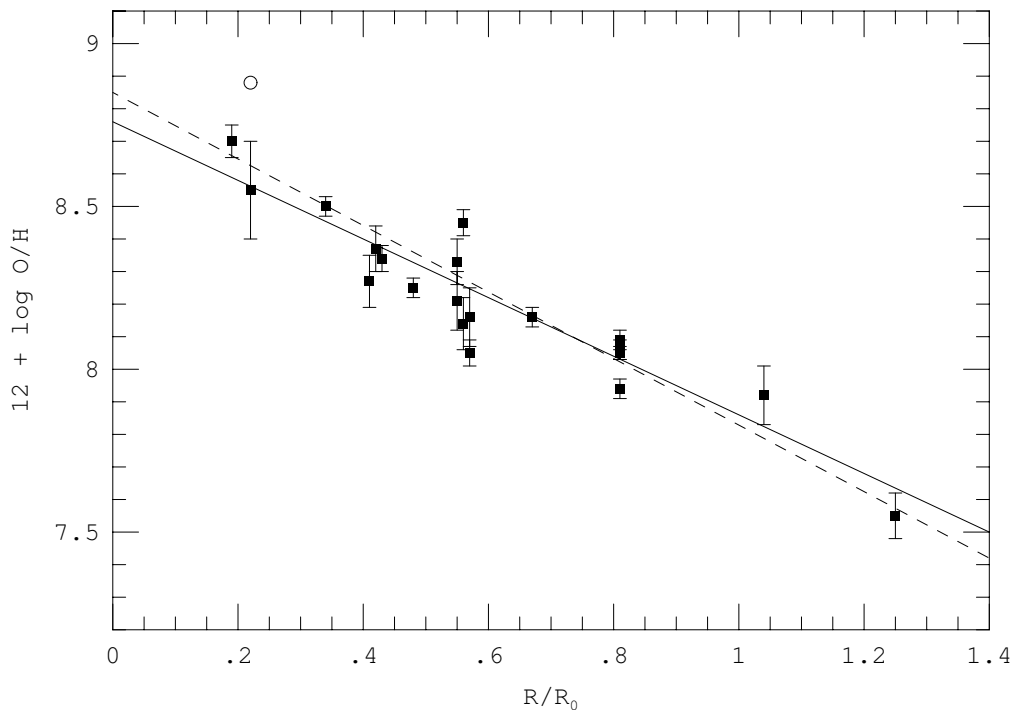
A extrapolação deste gradiente a distância  $R = 0$  kpc resulta em um valor para o núcleo de  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.76(\pm 0.06)$ . Desta forma, para AGNs, podemos inferir um valor de abundância de um certo elemento desde que o gradiente radial seja medido (ver [STORCHI-BERGMANN \*et al.\*, 1998](#); [DORS \*et al.\*, 2015](#); [KRABBE \*et al.\*, 2021](#)).

## 1.4 Motivação

Na última década, vários autores têm se dedicado a determinação da abundância química de AGNs, tanto a baixo ( $z < 0,4$ , ver [DORS \*et al.\*, 2020a](#)) quanto a alto ( $z > 6$ , ver [DORS \*et al.\* 2019](#)) *redshifts*. Entretanto, a maioria dos estudos consiste em determinações de abundância química do oxigênio e/ou da metalicidade. Em particular, a abundância química do argônio em AGNs ainda é pouco conhecida, motivando o presente estudo.

Existem, disponíveis na literatura, dados espectroscópicos de Seyfert 2, como os obtidos do banco de dados do SDSS-DR7 selecionados por [Dors \*et al.\* \(2020a\)](#). Esses

Figura 4 – Gradiente de O/H na galáxia em espiral M 101 obtido por [Kennicutt, Bresolin e Garnett \(2003\)](#). Cada ponto em preto representa o valor de O/H de uma região H II obtido utilizando o método- $T_e$ . O círculo representa estimativa de O/H para a região H II H36 (Searle 5) por [Kinkel e Rosa \(1994\)](#). A reta representa um ajuste aos pontos dados pela Equação 17 sem considerar o valor obtido por [Kinkel e Rosa \(1994\)](#). O termo  $R$  representa a distância radial ao núcleo e é normalizada pelo raio isofotal  $R_0=32.4$  kpc.



Fonte: [Kennicutt, Bresolin e Garnett \(2003\)](#)

dados compreendem as seguintes intensidades de linhas de emissão (relativo a  $H\beta$ ):  $[O\ II]\lambda 3726+3729$ ,  $[Ne\ III]\lambda 3869$ ,  $[O\ III]\lambda 4363$ ,  $[O\ III]\lambda 5007$ ,  $He\ I\lambda 5876$ ,  $[O\ I]\lambda 6300$ ,  $[N\ II]\lambda 6584$ ,  $[S\ II]\lambda 6716$ ,  $[S\ II]\lambda 6731$ , e  $[Ar\ III]\lambda 7135$ . O uso destes dados, combinados com modelos de fotoionização e metodologias desenvolvidas pelo nosso grupo, possibilitam a determinação, baseada no método- $T_e$  e em modelos de fotoionização, da abundância do oxigênio (ou metalicidade) e do argônio.

A teoria de nucleossíntese estelar prediz uma origem primária para o oxigênio e para o argônio (também para o enxofre e o neônio), que são sintetizados no núcleo de estrelas massivas ( $M \gtrsim 10 M_\odot$ ) que ao evoluírem tornam-se supernovas. Logo, é esperado uma pequena (ou nenhuma) variação das abundância de Ar/O com O/H (ou  $Z$ ), como reportado por [Kennicutt, Bresolin e Garnett \(2003\)](#). Entretanto, como podemos verificar na Figura 3, claramente há uma dependência da abundância de Ar/O com O/H, pelo

menos para o regime de baixa metalicidade [ $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 8,0$ ]. Para o regime de alta metalicidade ( $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \gtrsim 8,8$ ) não conhecemos o comportamento destes elementos. Nesse sentido, determinações de Ar/H em AGNs, por possuírem, na maior parte dos casos, altos valores de O/H (superiores a de galáxias com formação estelar), podem produzir importantes informações sobre a nucleossíntese estelar no regime de alta metalicidade. Em resumo, as principais motivações deste trabalho são:

1. Existem dados observacionais que tornam possíveis a determinação da abundância do argônio em AGNs tipo Seyfert 2;
2. A abundância do argônio é pouco conhecida ou desconhecida em AGNs tipo Seyfert 2;
3. Determinações da abundância do argônio em Seyfert 2 pode fornecer importantes informações sobre a nucleossíntese estelar no regime de alta metalicidade.

## 1.5 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Desenvolver uma metodologia para derivar a abundância do argônio (Ar/H) baseada no método- $T_e$  e no método de linhas fortes;
- Derivar a abundância do argônio em uma amostra de Seyfert 2 obtida do SDSS-DR7;
- Investigar a relação entre as abundâncias de Ar/O e O/H no regime de alta metalicidade ( $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \gtrsim 8,8$ ).

## 2 ESTIMATIVAS DE ABUNDÂNCIA DE ARGÔNIO EM NÚCLEOS DE GALÁXIAS TIPO SEYFERT 2

Este capítulo é baseado no artigo [Monteiro e Dors \(2021, MNRAS, 508, 3023\)](#).

### 2.1 Histórico de estimativas de abundâncias em AGNs

Os Núcleos Ativos Galácticos (AGNs) apresentam fortes linhas de emissão de metais em seus espectros óticos, que quando combinadas com as linhas de recombinação do hidrogênio permitem estimar a abundância de elementos pesados e a metalicidade no gás existente nesses objetos. AGNs desempenham um papel importante em estudos de abundância química de objetos no universo local ( $z \lesssim 0,4$ ) e nos primeiros estágios da formação de galáxias. Isso ocorre devido às características acima mencionadas e por suas altas luminosidades.

Entre os elementos pesados, o oxigênio apresenta fortes linhas de emissão (exemplo,  $[\text{O II}]\lambda 3726, \lambda 3729$ ;  $[\text{O III}]\lambda 5007$ ) emitidas por seus íons mais abundantes ( $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^{2+}$ ) no espectro óptico de nebulosas gasosas, isto é, regiões H II, nebulosas planetárias e também em AGNs (e.g., [PEIMBERT; COSTERO, 1969](#); [KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003](#); [MACIEL; QUIREZA; COSTA, 2007](#); [DOPITA \*et al.\*, 2015](#); [FLURY; MORAN, 2020](#); [DORS \*et al.\*, 2020b](#)). Portanto, a metalicidade ( $Z$ ) do gás localizado em objetos emissores de linhas (OEL) é comumente traçada pela abundância de oxigênio em relação ao hidrogênio ( $\text{O}/\text{H}$ ) (e.g., [MCGAUGH, 1991](#); [YATES; KAUFFMANN; GUO, 2012](#); [KEWLEY; NICHOLLS; SUTHERLAND, 2019](#)), como reportado no capítulo anterior. Ao contrário do oxigênio, outros elementos como os gases nobres (e.g., Ne, Ar) apresentam, no espectro óptico de OELs, linhas de emissão de somente alguns de seus íons (por exemplo,  $\text{Ne}^{2+}$ ,  $\text{Ar}^{2+}$ ), o que torna necessário o uso de Fatores de Correção Ionização (ICFs, [PEIMBERT; COSTERO, 1969](#)), que devem ser aplicados com alguma precaução pois estão sujeitos a incertezas (e.g., [STASIŃSKA, 2002](#); [DELGADO-INGLADA; MORISSET; STASIŃSKA, 2014](#); [DORS \*et al.\*, 2013](#); [DORS \*et al.\*, 2016](#)). No entanto, os gases nobres não apresentam reações químicas com eles próprios ou com outras espécies químicas, não participando da formação de moléculas e grãos de poeira, ao contrário do oxigênio, que possui uma abundância em grãos de poeira da ordem de 0,1 dex (e.g., [IZOTOV \*et al.\*, 2006](#); [PILYUGIN; THUAN; VÍLCHEZ, 2007](#)). Apesar do uso de ICFs, esta vantagem torna os gases nobres bons indicadores da metalicidade e podem fornecerem informações úteis para estudos de nucleossíntese estelar. Por exemplo, medindo a abundância do argônio em uma certa região de uma galáxia, podemos testar o produto de estrelas massivas que enriquece o meio interestelar. Ou seja, podemos testar a teoria de reações nucleares que ocorrem no interior estelar.

O método- $T_e$ , descrito anteriormente, é amplamente utilizado na literatura como o método mais confiável para determinar a abundância química de metais em nebulosas gasosas (para uma revisão, consulte PEIMBERT; PEIMBERT; DELGADO-INGLADA, 2017; PÉREZ-MONTERO, 2017). A similaridade entre valores da abundância de O/H em regiões H II na vizinhança solar e aquelas obtidas a partir de observações da linha O I  $\lambda$ 1356 emitida pelo meio interestelar (ver PILYUGIN, 2003 e referências nele) reforçou a confiança no método- $T_e$ . Além disso, uma boa concordância entre as estimativas da abundância O/H em regiões H II e em estrelas do tipo B localizadas na Via Láctea e em galáxias próximas foi recentemente obtida (e.g., CIPRIANO *et al.*, 2017). Logo, baseado na confiabilidade no método- $T_e$ , ao longo de décadas este método tem sido utilizado para determinações de abundância de metais (O, N, S, Ar, etc.) em milhares de regiões de formação estelar (SFs, i.e., regiões H II, galáxias H II) no universo local e em alguns objetos localizados em altos *redshifts* (ver DORS *et al.*, 2020 e referências nele).

Infelizmente, uma situação oposta é encontrada para AGNs, onde, com exceção do oxigênio, a maioria das determinações de abundâncias de outros elementos não estão disponíveis na literatura. De fato, a determinação de abundância de metais mais completa em um AGN e baseada no método- $T_e$  foi a realizada por Osterbrock e Miller (1975) para Cygnus A ( $z = 0,05607$ ). Estes autores derivaram a abundância de O, N, Ne, S e Fe em relação à abundância do hidrogênio. Após este trabalho pioneiro, alguns poucos estudos aplicaram o método- $T_e$  em estimativas de abundância em AGNs e, na maioria dos casos, apenas a abundância de oxigênio foi obtida (e.g., ALLOIN *et al.*, 1992; IZOTOV; THUAN, 2008; REVALSKI *et al.*, 2018a, 2018b, 2021; DORS *et al.*, 2015, 2020a, 2020b). Recentemente, Flury e Moran (2020), adotando uma metodologia baseada na engenharia reversa do método- $T_e$ , derivaram a primeira relação (N/O)-(O/H) para AGNs. Embora estudos baseados em modelos de fotoionização foram aplicados para derivar a abundância de metais em AGNs (e.g., FERLAND; TRURAN, 1980; STASIŃSKA, 1984; FERLAND; OSTERBROCK, 1986; STORCHI-BERGMANN *et al.*, 1998; GROVES; HECKMAN; KAUFFMANN, 2006; FELTRE; CHARLOT; GUTKIN, 2016; CASTRO *et al.*, 2017; PÉREZ-MONTERO *et al.*, 2019; THOMAS *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2020; DORS *et al.*, 2021), a maioria deles obteve apenas estimativas de O/H (ou metalicidade) em AGNs.

Em particular, a determinação da abundância do argônio em AGNs é muito importante no estudo da evolução química de galáxias e em estudos de nucleossíntese estelar, pois a produção estelar e posterior ejeção deste elemento no Meio Interestelar (doravante ISM) no regime de alta metalicidade podem ser conhecidas. Como reportado anteriormente, a teoria de nucleossíntese estelar sugere uma origem primária para oxigênio e argônio, que são produzidos predominantemente em estrelas massivas que no final de sua evolução tornam-se supernovas (e.g., WOOSLEY; WEAVER, 1995). Assim, assumindo

que estrelas se formam com uma Função de Massa Inicial (IMF)<sup>1</sup> universal, espera-se um valor relativamente constante da razão de abundância Ar/O com a variação O/H (ou metalicidade), conforme derivado por vários autores em estudos de abundância de SFs (e.g., THUAN; IZOTOV; LIPOVETSKY, 1995; IZOTOV; THUAN, 1999; ZEE; HAYNES, 2006; GUSEVA *et al.*, 2011; ZEE; HAYNES, 2006). No entanto, alguns autores encontraram comportamentos diferentes de Ar/O com O/H. Por exemplo, Izotov *et al.* (2006), utilizando uma amostra de 310 núcleos de galáxias com formação estelar, sendo os dados observacionais utilizados nas derivações de abundâncias foram obtidos do SDSS-DR3 (ABAZAJIAN *et al.*, 2005), encontraram que a razão de abundância de Ar/O diminui em 0,15 dex com o aumento de O/H para o intervalo  $7,1 \lesssim 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 8,5$  (veja também PÉREZ-MONTERO *et al.*, 2007). Por outro lado, resultados recentes do projeto CHAOS (BERG *et al.*, 2015) obtidos por Berg *et al.* (2020), que aplicaram o método- $T_e$  para 190 regiões H II localizadas em discos de galáxias espirais próximas, encontraram Ar/O constante e semelhante ao valor solar para o intervalo  $8,3 \lesssim 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 9,0$  e uma diminuição desta razão de abundância para o regime de baixa metalicidade [ $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 8,0$ ]. Kennicutt, Bresolin e Garnett (2003), considerando medidas de abundância em regiões H II no disco da galáxia espiral M 101, sugeriram que Ar/O diminui com o aumento de O/H no regime de alta metalicidade [ $8,5 \lesssim 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 8,7$ ]. Em resumo, baseando-se nos resultados supracitados para SFs, não há um consenso se Ar/O varia ou não com O/H ou, não se pode afirmar se o argônio é um elemento de origem primária ou secundária.

Para o regime de metalicidade muito alta [ $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \gtrsim 8,8$ ], o comportamento de Ar/O com O/H é pouco conhecido devido à incapacidade de se aplicar o método- $T_e$  neste regime. Recentemente, Dors *et al.* (2020) adaptaram o método- $T_e$  para estudos de abundância química de AGNs e possibilitaram a obtenção de estimativas diretas de O/H até o regime de alta metalicidade, i.e.  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \approx 9,3$ , um valor de abundância aproximadamente 0,3 dex superior ao valor máximo obtido para SFs (PILYUGIN; THUAN; VÍLCHEZ, 2007; BERG *et al.*, 2020). Também, Armah *et al.* (2021) aplicaram o método- $T_e$  em uma amostra de Seyfert 2 com o objetivo de estimar a abundância do neônio e oxigênio. Estes autores encontraram uma tendência de Ne/O aumentar com O/H no regime de alta metalicidade. Este resultado indica que o neônio tem uma origem secundária para o regime de alta metalicidade

Neste contexto, usamos o método- $T_e$  e desenvolvemos uma nova metodologia baseada em modelos de fotoionização para calcular a abundância de argônio em relação ao hidrogênio em NLRs de núcleos Seyfert 2. O presente estudo está organizado da seguinte forma: na Seção 2.2 é apresentada a metodologia utilizada para estimar as abundâncias de oxigênio e argônio; os resultados e a discussão são apresentados na Seção 2.3; as conclusões do nosso estudo são apresentadas na Seção 4.

<sup>1</sup> Para uma discussão sobre a universalidade do IMF ver, por exemplo, Bastian, Covey e Meyer (2010).

## 2.2 Metodologia

Para determinar a abundância total de argônio e oxigênio em relação à abundância do hidrogênio (Ar/H, O/H), primeiramente, consideramos intensidades de linhas de emissão de AGNs tipo Seyfert 2 observadas no óptico compiladas do Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (SDSS-DR7, [YORK \*et al.\*, 2000](#)). Esses dados observacionais foram usados para calcular as abundâncias Ar/H e O/H usando o método- $T_e$ . Utilizamos modelos de fotoionização, construídos com o código CLOUDY ([FERLAND \*et al.\*, 2017](#)), a fim de obter um ICF para o Ar<sup>2+</sup> e uma estimativa da temperatura dos elétrons que estão excitando este íon. A seguir é apresentada uma descrição dos dados observacionais e a metodologia adotada para obtenção das abundâncias.

### 2.2.1 Dados Observacionais

Usamos intensidades de linha de emissão do óptico ( $3000 < \lambda(\text{Å}) < 7200$ ) corrigidas por avermelhamento de uma amostra de núcleos Seyfert 2 obtida do SDSS-DR7 ([YORK \*et al.\*, 2000](#)) e medidas pelo grupo MPA/JHU<sup>2</sup>. A amostra consiste em 463 núcleos Seyfert 2 com redshift  $z \lesssim 0,4$  e massas estelares das galáxias hospedeiras na faixa de  $9,4 \lesssim \log(M/M_\odot) \lesssim 11,6$  selecionada por [Dors \*et al.\* \(2020\)](#). Desta amostra, nós consideramos uma subamostra contendo apenas objetos que possuem as linhas de emissões [O II]  $\lambda 3726 + 3729$ , [O III]  $\lambda 4363$ , [O III]  $\lambda 5007$ , H $\alpha$ , [S II]  $\lambda 6716$ , [S II]  $\lambda 6731$  e [Ar III]  $\lambda 7135$  medidas com um erro inferior a 50%. Este critério reduziu a amostra para 64 objetos dos 463 selecionados por [Dors \*et al.\* \(2020\)](#), sendo que os objetos desta subamostra possuem *redshift* na faixa de  $0,04 \lesssim z \lesssim 0,25$  e intervalo das massas estelares das galáxias hospedeiras de  $9,9 \lesssim \log(M/M_\odot) \lesssim 11,2$ .

Na Figura 5, o diagrama proposto por Baldwin, Phillips & Terlevich ([BALDWIN; PHILLIPS; TERLEVICH, 1981](#)),  $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$  versus  $\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ , contendo as intensidades das razões de linhas para os 64 objetos é apresentado. Também nesta figura, o critério de classificação teórica (representado pela linha preta) proposto por [Kewley \*et al.\* \(2001\)](#), o qual sugere que objetos com

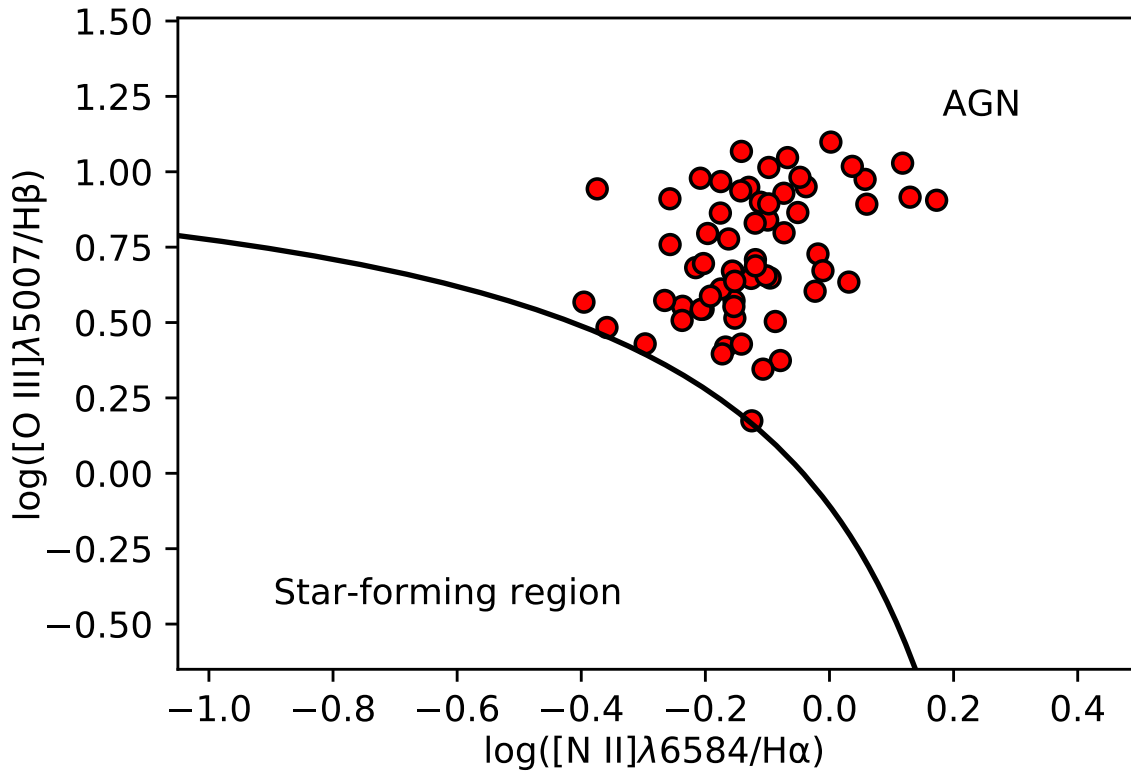
$$\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > \frac{0,61}{\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) - 0,47} + 1,19 \quad (18)$$

são classificados como AGNs, caso contrário, como regiões de formação de estrelas, é mostrado. Pode ser visto que a amostra cobre uma grande faixa de grau de ionização, uma vez que uma ampla faixa de [O III]/H $\beta$  é observada (e.g., [FELTRE; CHARLOT; GUTKIN, 2016](#)).

A densidade de eletrônica ( $N_e$ ) de cada um dos 64 núcleos Seyfert 2 foi calculada a partir da razão de linha [S II]  $\lambda 6716/\lambda 6731$ , assumindo uma temperatura eletrônica de

<sup>2</sup> <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/>

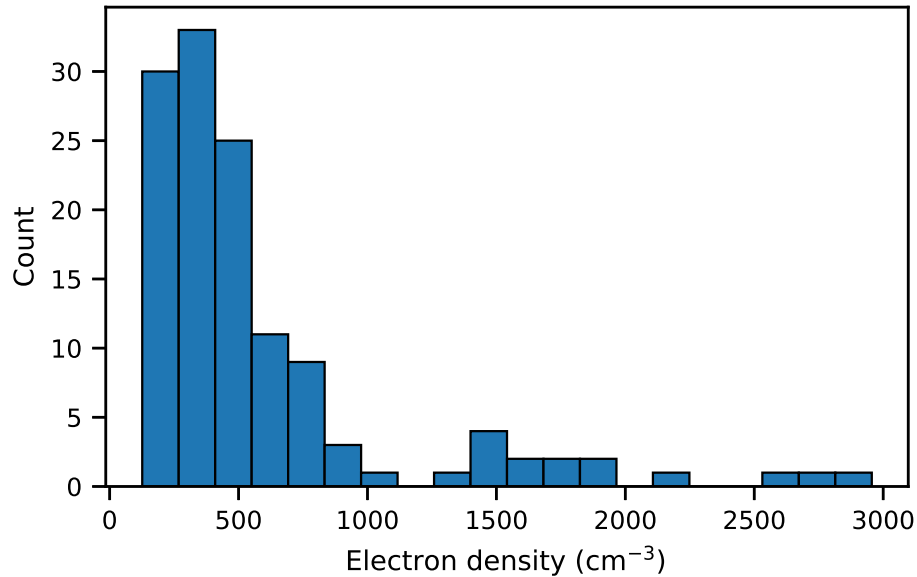
Figura 5 – Diagrama diagnóstico  $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$  versus  $\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ . Pontos vermelhos representam nossa amostra de núcleos Seyfert 2 (ver Seção 2.2.1) cujas razões de linhas observacionais foram obtidas do SDSS-DR7 (YORK *et al.*, 2000) e medidas pelo grupo MPA/JHU. A linha sólida preta representa a separação entre AGN e regiões de formação estelar proposta por Kewley *et al.* (2001) e dada pela Eq. 18.



Fonte: Autor

10 000 K, e usando a rotina PYNEB (LURIDIANA; MORISSET; SHAW, 2015). Na Figura 6 um histograma contendo a distribuição  $N_e$  de nossa amostra é apresentado. Pode-se ver que os valores de  $N_e$  para nossa amostra (o valor máximo é  $\sim 3000 \text{ cm}^{-3}$ ) são menores do que a densidade crítica (i.e.,  $10^{4-8} \text{ cm}^{-3}$ , VAONA; TROCAR; HAMMER, 2012) das linhas de emissão envolvidas no presente estudo, portanto, os efeitos da de-excitação colisional são insignificantes na formação de linhas de emissão da nossa amostra e, conseqüentemente, possuem pouca influência sobre as estimativas de abundância. A descrição completa dos critérios de seleção adotada para obter a amostra, bem como uma discussão sobre os efeitos da abertura na determinação da abundância são apresentados em Dors *et al.* (2020). Além disso, os efeitos da variação da densidade eletrônica ao longo do raio AGN, regiões dominadas por Raios X, choque de gás, flutuações da temperatura eletrônica em determinações de abundância foram discutidas por Dors *et al.* (2020) e Dors *et al.* (2021). Apresentaremos, a seguir, uma composição dos critérios e discussões mencionados acima.

Figura 6 – Histograma mostrando a distribuição de valores de densidade eletrônica da nossa amostra de 64 objetos (ver Seção 2.2.1) calculados com a rotina PYNEB (LURIDIANA; MORISSET; SHAW, 2015) e considerando uma temperatura eletrônica de  $10^4$  K. O eixo  $y$  representa o número de objetos com um dado valor na faixa da densidade eletrônica.



Fonte: Autor

### 2.2.1.1 Seleção da amostra

Para produzir uma amostra de AGNs tipo 2 com intensidades de linhas de emissão ópticas estreitas, Dors *et al.* (2020) usaram as medições do Sloan Digital Sky Survey (SDSS, YORK *et al.*, 2000), dados DR7, disponibilizados pelo grupo MPA/JHU. O procedimento de medição das intensidades da linha de emissão foi descrito em detalhes por Tremonti *et al.* (2004).

Nos dados mencionados existem 927.552 objetos com uma relação sinal-ruído (S/N) maior que 2 e  $z < 0,7$  dos quais 778.695 têm estimativas de massa estelar e foi aplicado como critério inicial selecionar apenas os objetos contendo medições das linhas [O II] $\lambda$ 3727, H $\beta$ , [O III] $\lambda$ 5007, [O I] $\lambda$ 6300, H $\alpha$ , [N II] $\lambda$ 6584, e [S II] $\lambda$ 6717,31. Ao adotar esse procedimento, a amostra foi reduzida a 538.878 objetos.

Posteriormente, para classificar objetos como tipo AGN ou como tipo região de formação de estrelas, foram usados diagramas de Baldwin-Phillips-Terlevich (BPT) (BALDWIN; PHILLIPS; TERLEVICH, 1981; VEILLEUX; OSTERBROCK, 1987) adotando os critérios propostos por Kewley *et al.* (2001) e Pérez-Montero *et al.* (2013), que afirmam que objetos tipo AGN são aqueles que satisfazem às expressões dadas por (19), (20), (21) e (22).

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

$$\log ([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > \frac{0,72}{\log ([\text{S II}]\lambda \lambda 6717+31/\text{H}\alpha) - 0,32} + 1,30 \quad (20)$$

$$\log ([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > \frac{0,73}{\log ([\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha) - 0,59} + 1,33 \quad (21)$$

$$\log ([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) > -1,05 \log ([\text{S II}]\lambda \lambda 6717+31/\text{H}\alpha) \quad (22)$$

No total, foram selecionados 69.517 objetos tipo AGN que atendem aos critérios apresentados por [Kewley \*et al.\* \(2001, 2006\)](#) e [Pérez-Montero \*et al.\* \(2013\)](#). Os objetos “compostos” definidos em [Kewley \*et al.\* \(2006\)](#) não estão incluídos na amostra.

Para os objetos selecionados, todos os fluxos da linha de emissão foram divididos pelo fluxo de  $\text{H}\beta$  correspondente. Foi utilizada a lei de extinção Galáctica de Milley e Mathews 1972.

A seguir, foi compilado uma bases de dados contendo informações básicas sobre 10.054 objetos classificados como AGNs Seyfert tipo 1 e 4.258 como Seyfert tipo 2, utilizando o NED/IPAC (Banco de Dados Extragaláctico da NASA/IPAC) e o *Garching’s database*. Com o SDSS objID fornecido pelas bases de dados NED/IPAC e Garching foi feita uma correspondência de dados encontrando 112 AGNs Seyfert tipo 1 e 463 Seyfert tipo 2.

Os dados produzidos pela MPA/JHU foram corrigidos de avermelhamento usando a metodologia apresentada por [O’Donnell \(1994\)](#). Foi utilizada a lei de extinção Galáctica de Milley e Mathews 1972, comparando as razões  $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$  observado com o valor teórico 2,86, assumindo caso B (Hummer; Storey 1987), considerando uma densidade eletrônica de  $100 \text{ cm}^{-3}$  e temperatura eletrônica de 10.000 K.

A determinação da massa ( $M$ ) dos objetos em nossa amostra é baseado em uma comparação entre espectros teóricos de códigos de síntese de população estelar (SSP) com as luminosidades da banda  $z$  da base realizadas por [Tremonti \*et al.\* \(2004\)](#) e [Kauffmann \*et al.\* \(2003\)](#). As massas estelares da amostra encontram-se na faixa de  $9,5 \lesssim \log(M_*/M_\odot) \lesssim 11,6$ . Os erros associados às determinações de  $M$  são principalmente devido a determinação da história de formação de estrelas, idades, metalicidades e extinção assumidas nos modelos SSPs, que podem diferir das reais em galáxias. Em geral, assume-se que o erro  $M$  é da ordem de 0,2 dex (ex. [MAIOLINO \*et al.\*, 2008](#); [TAYLOR \*et al.\*, 2011](#)).

Uma tabela listando a amostra resultante de Seyfert 2 AGNs está disponível em versão online contendo dados de avermelhamento, intensidades corrigidas (em relação a  $H = 1,0$ ) das linhas de emissão do  $[O II]\lambda\lambda 3726+3729$ ,  $[Ne III]\lambda 3869$ ,  $[O III]\lambda 4363$ ,  $[O III]\lambda 5007$ ,  $He I\lambda 5876$ ,  $[O I]\lambda 6300$ ,  $[N II]\lambda 6584$ ,  $[S II]\lambda 6716$ ,  $[S II]\lambda 6731$  e  $[Ar III]\lambda 7135$ , *redshifts*, coeficiente de correção de avermelhamento  $C(H)$ , densidade eletrônica (em unidades de partículas por  $cm^{-3}$ ) e massa.

### 2.2.1.2 Efeitos de abertura

A estimativa das propriedades físicas de objetos com diferentes *redshifts* cujos dados foram obtidos por instrumentos com uma abertura fixa, como os realizados pelo SDSS, estão sujeitos a algum grau de incerteza. Kewley, Jansen e Geller (2005) investigaram o efeito do tamanho da abertura para taxas de formação estelar, determinação de metalicidade e de avermelhamento para galáxias com tipos morfológicos distintos. Quanto à metalicidade, os autores encontraram que para a captura com abertura com menos de 20% da emissão total da galáxia, os valores derivados de metalicidade podem diferir por um fator de 0,14 dex daqueles obtidos quando a emissão total da galáxia é considerada.

Considerando que na amostra de 463 galáxias Seyfert 2 de Dors *et al.* (2020) apenas as propriedades da região nuclear estão sendo consideradas, o efeito de abertura pode não ser tão importante. Uma vez que o diâmetro das fibras ópticas do SDSS é de 3", e os valores de *redshift* estão na faixa de  $0,03 < z < 0,37$ , assumindo um Universo plano e com os parâmetros cosmológicos  $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0,270$  e  $\Omega_{vac} = 0,730$  (WRIGHT, 2006), a escala física ( $D$ ) no centro de cada galáxia corresponde a uma faixa de  $50 \lesssim D(\text{pc}) \lesssim 660$ , ou seja, a emissão é principalmente do AGN. Levando em consideração que Storchi-Bergmann *et al.* (2007) mostraram que a emissão mais forte da razão de linha  $[N II]\lambda 6584/H\alpha$  na região nuclear de NGC 6951 (núcleos LINER/Seyfert) está dentro de um raio nuclear com  $\approx 100 \text{ pc}$ , podemos concluir que para os objetos mais distantes da amostra, os fluxos medidos são emitidos principalmente por AGNs porque o fluxo de regiões de formação de estrelas circum-nucleares, se presentes, tem baixa contribuição para o fluxo total. O suporte para esta afirmação foi encontrado, recentemente, por Thomas *et al.* (2019), que mostraram que o efeito de abertura não é importante nas estimativas de  $Z$  em uma amostra de AGN semelhante à que está sendo considerada. No entanto, esses autores apontaram que uma mistura de emissões de AGN e regiões H II é esperada na maioria dos AGNs (ver também D'AGOSTINO *et al.*, 2019 e referências).

Para os objetos mais próximos, a metalicidade poderia estar sendo estimada apenas para a parte central dos AGNs e a metalicidade total do AGN ser diferente desta pequena região. Estudos de abundância de AGNs espacialmente resolvidos ainda são raramente encontrados na literatura e os resultados não são conclusivos. Por exemplo, dados ópticos da região nuclear da galáxia Seyfert 2 Markarian 573 obtidos por Revalski *et al.* (2018a) e

Thomas *et al.* (2018) mostraram que a abundância de oxigênio é quase constante, com variações não maiores que 0,10 dex ao longo da região central. Por outro lado, Thomas *et al.* (2018) encontraram para dois (NGC2992 e ESO 138-G010) dos quatro objetos analisados gradientes de metalicidade acentuados do núcleo, com  $(Z/Z_{\odot})$  variando de  $\approx 0,5$ , nas regiões externas, para  $\approx 2$ , no núcleo. Ressalta-se que estes objetos apresentam cones de ionização.

Para explorar a presença de um efeito de abertura Dors *et al.* (2020) estimaram, para uma amostra de AGNs, valores de abundância de oxigênio usando a calibração de Castro *et al.* (2017) procurando observar alguma influência perante a variação do *redshift* como apresentado no painel inferior da Figura 7. Esses autores consideraram os intervalos de *redshift*  $z = 0,0 - 0,1$ ,  $z = 0,1 - 0,2$  e  $z > 0,2$ . A média e o desvio padrão de  $12 + \log(O/H)$  para cada um destes intervalos são mostrados em vermelho na Figura 7. Como não se espera uma evolução química significativa na faixa  $z = 0 - 0,4$ , qualquer diferença sistemática nas médias de O/H poderia ser devido a efeitos de abertura. Como pode ser visto em Fig. 7, as abundâncias médias de oxigênio são semelhantes para todos os intervalos de *redshift* ( $\approx 8,64$  dex). No painel superior da Figura 7, as densidades eletrônicas ( $N_e$ ) em função do *redshift* são apresentados, assim como os valores de densidade média, com os desvios padrão, para os mesmos intervalos de *redshift* definidos acima. As densidades foram estimadas a partir da razão da linha de emissão  $[S\ II]\lambda 6716/\lambda 6731$ . Uma vez que as densidades eletrônicas em AGNs são maiores por cerca de um fator de 2 do que para regiões H II (ver, por exemplo, COPETTI *et al.*, 2000; KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003; DORS *et al.*, 2014; SANDERS *et al.*, 2015), espera-se que se houver uma contribuição significativa para a emissão de enxofre pelas regiões H II nos fluxos do SDSS, um decréscimo da  $N_e$  com o aumento do  $z$  seria encontrado. Como pode ser visto no painel superior da Figura 7, os valores médios de  $N_e$  nos diferentes intervalos são muito semelhantes ( $\approx 650\text{ cm}^{-3}$ ), indicando que este parâmetro não muda com o *redshift*. Portanto, conclui-se que os efeitos de abertura não são significativos para as estimativas de parâmetros dos objetos da amostra.

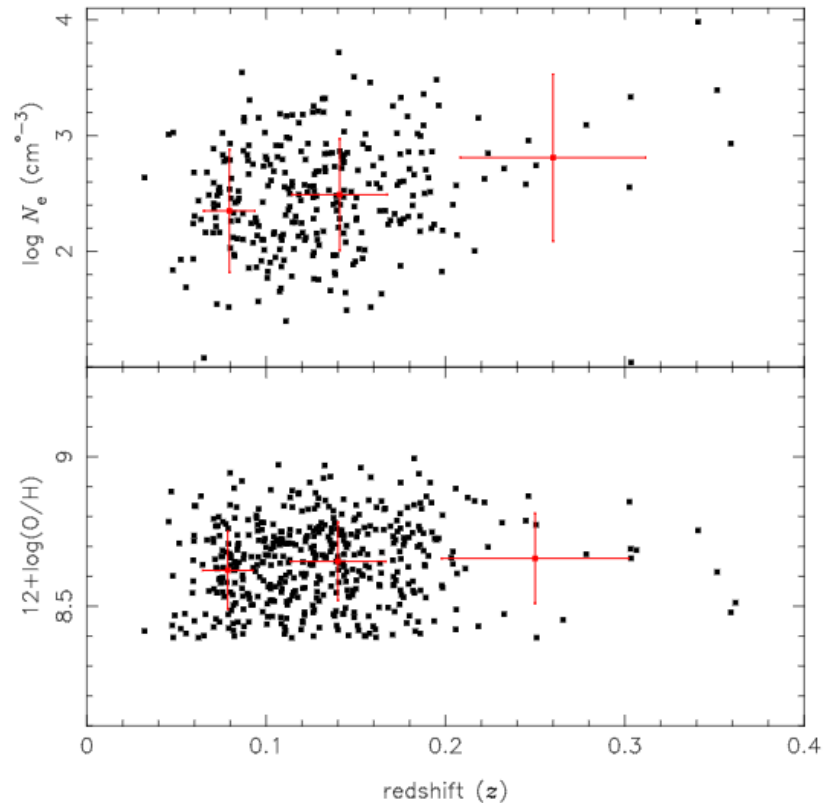
## 2.2.2 Método- $T_e$

Seguimos uma metodologia semelhante à proposta por Pérez-Montero (2017), Dors *et al.* (2020) e Armah *et al.* (2021) para estimar a abundância de Ar/H e O/H para a amostra de objetos. No que segue, esta metodologia é apresentada.

### 2.2.2.1 Abundância do oxigênio

Para cada objeto da amostra, calculamos a temperatura da região do gás da NLR com alta ionização ( $t_3$ ) e a densidade eletrônica ( $N_e$ ) com base na dependência desses parâmetros nebulares com as razões de linhas  $RO3 = [O\ III](\lambda 4949 + \lambda 5007)/\lambda 4363$

Figura 7 – Painel inferior: Abundância de oxigênio [em unidades de  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ ] versus o *redshift* para a amostra de AGNs. A abundância de oxigênio foi calculada usando a calibração proposta por [Castro \*et al.\* \(2017\)](#). Os pontos vermelhos representam a média e as barras de erro o desvio padrão para o *redshift* em intervalos de  $z = 0,0-0,1$ ,  $z = 0,1-0,2$ , e  $z > 0,2$ . Painel superior: O mesmo que o painel inferior, mas para o logaritmo da densidade eletrônica ( $N_e$ ).



Fonte: [Dors \*et al.\* \(2020\)](#)

e  $[\text{S II}]\lambda 6716/\lambda 6731$ , respectivamente. Usamos o função `GETCROSSTEMDEN` do código `PYNEB` ([LURIDIANA; MORISSET; SHAW, 2015](#)), sendo o valor de cada parâmetro ( $t_3$  e  $N_e$ ) é obtido por interação sobre as duas razões de linha acima. Os erros de  $N_e$  e  $t_3$  foram calculados adicionando valores seguindo a distribuição de Monte Carlo à amostra com a função `ADDMONTECARLOOBS` do código `PYNEB`. O símbolo  $t_3$  representa a temperatura eletrônica em unidades de  $10^4$  K. O valor médio derivado de  $t_3$  da nossa amostra é  $\sim 1.5$  e a incerteza é  $\sim 0.3$ . Para a densidade eletrônica, encontramos um valor médio de  $470 \text{ cm}^{-3}$  e uma incerteza de  $\sim 250 \text{ cm}^{-3}$ .

Uma vez que não é possível estimar a temperatura para a zona de baixa ionização do gás ( $t_2$ ), devido à ausência das intensidades das linhas aurorais  $[\text{N II}]\lambda 5755$  e  $[\text{O II}]\lambda 7319, \lambda 7330$ , a seguinte relação teórica entre  $t_2$ - $t_3$ , derivada por [Dors \*et al.\* \(2020\)](#) para estudos de abundância química de AGNs e obtida a partir de uma grade de modelo de fotoionização construída com o código `CLOUDY` ([FERLAND \*et al.\*, 2013](#)) por [Carvalho](#)

*et al.* (2020), foi adotada:

$$t_2 = (a \times t_3^3) + (b \times t_3^2) + (c \times t_3) + d, \quad (23)$$

sendo  $a = 0,17$ ,  $b = -1,07$ ,  $c = 2,07$ ,  $d = -0,33$ . Os valores de  $t_2$  e  $t_3$  são em unidades de  $10^4$  K. Em [Riffel \*et al.\* \(2021\)](#), esta relação foi comparada com estimativas diretas de temperatura eletrônica, i.e., com valores de  $t_3$  e  $t_2$  calculados a partir das suas relações com valores observacionais das razões de linhas  $RO3$  e  $RN2 = [N\ II](\lambda 6548 + \lambda 6584) / \lambda 5755$ , respectivamente. Um bom acordo foi encontrado entre a relação teórica (Eq. 23) e os valores derivados a partir das linhas observacionais. No entanto, esses autores indicaram que para objetos com *outflows* a Eq. 23 subestima o valor de  $t_2$ .

Para calcular as abundâncias de  $O^{2+}$  e  $O^+$  em relação a  $H^+$  foram usadas as seguintes expressões dadas por [Pérez-Montero \(2017\)](#):

$$12 + \log \left( \frac{O^{2+}}{H^+} \right) = \log \left( \frac{1.33 \times I([O\ III]\lambda 5007)}{I(H\beta)} \right) + 6.1868 + \frac{1.2491}{t_3} - 0.55816 \log(t_3) \quad (24)$$

e

$$12 + \log \left( \frac{O^+}{H^+} \right) = \log \left( \frac{I([O\ II]\lambda 3726 + \lambda 3729)}{I(H\beta)} \right) + 5.887 + \frac{1.641}{t_2} - 0.543 \log(t_2) + 0.000114 n_e, \quad (25)$$

respectivamente, sendo  $n_e$  a densidade eletrônica  $N_e$  em unidades de  $10^4 \text{ cm}^{-3}$ . A incerteza de  $t_3$  foi considerada na determinação de  $t_2$ . Assim, a incerteza na derivação de  $O^{2+}/H^+$  é devido as incertezas da razão de linha  $[O\ III]/H\beta$  e de  $t_3$ . O mesmo procedimento foi considerado para a derivação de  $O^+/H^+$ , sendo a sua incerteza devido as incertezas de  $[O\ II]/H\beta$ ,  $t_2$  e  $n_e$ .

A abundância total de oxigênio é calculada por

$$\frac{O}{H} = \text{ICF}(O) \times \left[ \frac{O^{2+}}{H^+} + \frac{O^+}{H^+} \right]. \quad (26)$$

Não é possível derivar  $\text{ICF}(O)$  por meio da expressão proposta por [Torres-Peimbert e Peimbert \(1977\)](#) devido a ausência do  $\text{He\ II}\lambda 4686$  em nossos dados observacionais. Assim, assumimos  $\text{ICF}(O) = 1,20$ , um valor médio obtido por [Flury e Moran \(2020\)](#) e [Dors \*et al.\* \(2020\)](#) para Seyfert 2. Os valores do  $\text{ICF}$  do oxigênio correspondem, em média, a uma correção na abundância de  $O/H$  para AGNs de  $\sim 0.1$  dex, ou seja, na ordem da incerteza de  $O/H$  derivada em  $\text{H\ II}$  regiões via estimativas utilizando o método- $T_e$  (e.g., [KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003](#); [HÄGELE \*et al.\*, 2008](#); [BERG \*et al.\*, 2020](#)).

### 2.2.2.2 Abundância do argônio

Geralmente, para estimar a temperatura dos elétrons que estão excitando o  $\text{Ar}^{2+}$ , a abordagem proposta por Garnett (1992), que é baseada em resultados de modelo de fotoionização, é assumida em estudos de abundância química de SFs (e.g., KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003; HÄGELE *et al.*, 2008): uma temperatura eletrônica similar é assumida para as regiões do gás onde os íons  $\text{Ar}^{2+}$  e  $\text{S}^{2+}$  estão localizados, ou seja,

$$T_e(\text{Ar III}) = T_e(\text{S III}). \quad (27)$$

O valor de  $T_e(\text{S III})$  pode ser calculado diretamente a partir da razão observacional das linhas  $RS3=[\text{S III}](\lambda 9069+\lambda 9532)/\lambda 6312$  ou pela seguinte relação teórica (obtida utilizando resultados de modelos de fotoionização simulando regiões H II) proposta por Garnett (1992) e dada por

$$T(\text{S III}) = 0.83T(\text{O III}) + 1700 \text{ K} \quad (28)$$

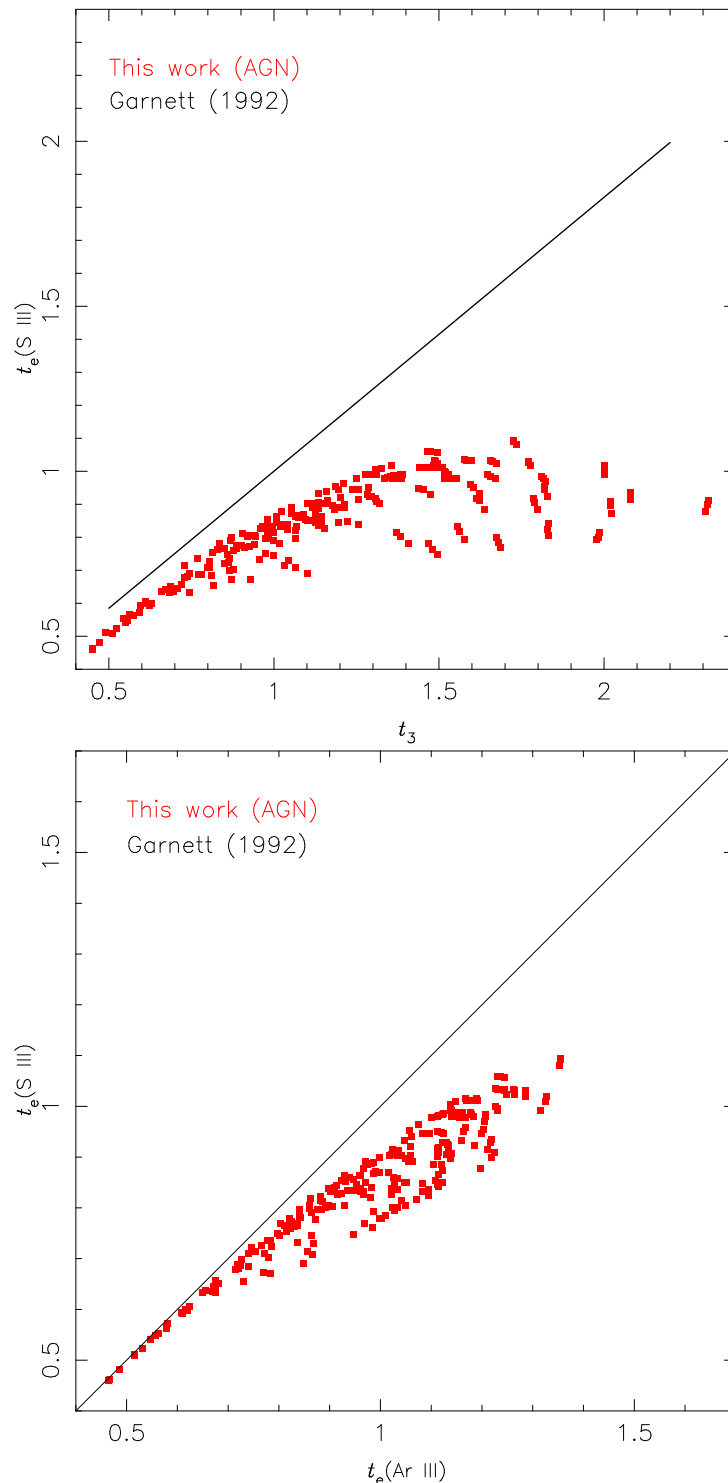
quando  $RS3$  não é medida. Na Eq. 28,  $T(\text{O III}) = t_3 \times 10^4 \text{ K}$ .

Dors *et al.* (2020) mostraram que, em geral, AGNs apresentam uma estrutura de ionização e de temperatura distintas das de regiões H II (ver também DORS *et al.*, 2021; RIFFEL *et al.*, 2021). Assim, deve-se verificar a validade das Eqs. 27 e 28 para AGNs. Para isto, utilizamos os resultados da grade de modelos de fotoionização construída por Carvalho *et al.* (2020) para derivar uma relação entre  $T_e(\text{Ar III})$  e  $T_e(\text{S III})$  para AGNs. Esta grade de modelos de fotoionização considera uma ampla faixa de parâmetros nebulares de AGNs cujas linhas de emissão preditas (para a faixa espectral no ótico) reproduzem as de uma grande amostra de núcleos tipo Seyfert 2 (para uma descrição detalhada desses modelos ver CARVALHO *et al.*, 2020). Os valores de temperatura fornecidos pelos modelos de fotoionização e considerados aqui correspondem à temperatura média para  $\text{Ar}^{2+}$  e  $\text{S}^{2+}$  calculada ao longo do raio do AGN e considerando um peso para a densidade do eletrônica ( $N_e$ ). Uma vez que  $N_e$  é assumido constante ao longo do raio nebuloso, o peso dado a este parâmetro não influencia muito o valor de  $T_e$ . Recentemente, esses modelos foram também utilizados por Armah *et al.* (2021) para mostrar que para AGNs não é correto assumir  $T_e(\text{Ne III}) = T_e(\text{O III})$ , como usualmente é considerado em estudos de regiões H II.

Na Figura 8, painel inferior, os valores fornecidos pelos modelos de fotoionização de Carvalho *et al.* (2020) para  $T_e(\text{S III})$  versus  $T_e(\text{Ar III})$  (em unidades de  $10^4 \text{ K}$ ) e a relação proposta por Garnett (1992) (Eq. 27) são mostrados. Pode-se ver que, em contraste com as regiões H II,  $T_e(\text{Ar III})$  é geralmente maior do que  $T_e(\text{S III})$ , indicando que a Eq. 27 não é válida para estudos de abundância de AGNs. O mesmo pode ser visto na Figura 8, painel superior, onde os resultados dos modelos simulando AGNs mostram uma grande diferença da relação de temperatura dada pela Eq. 28 e utilizada em estudos de regiões H II.

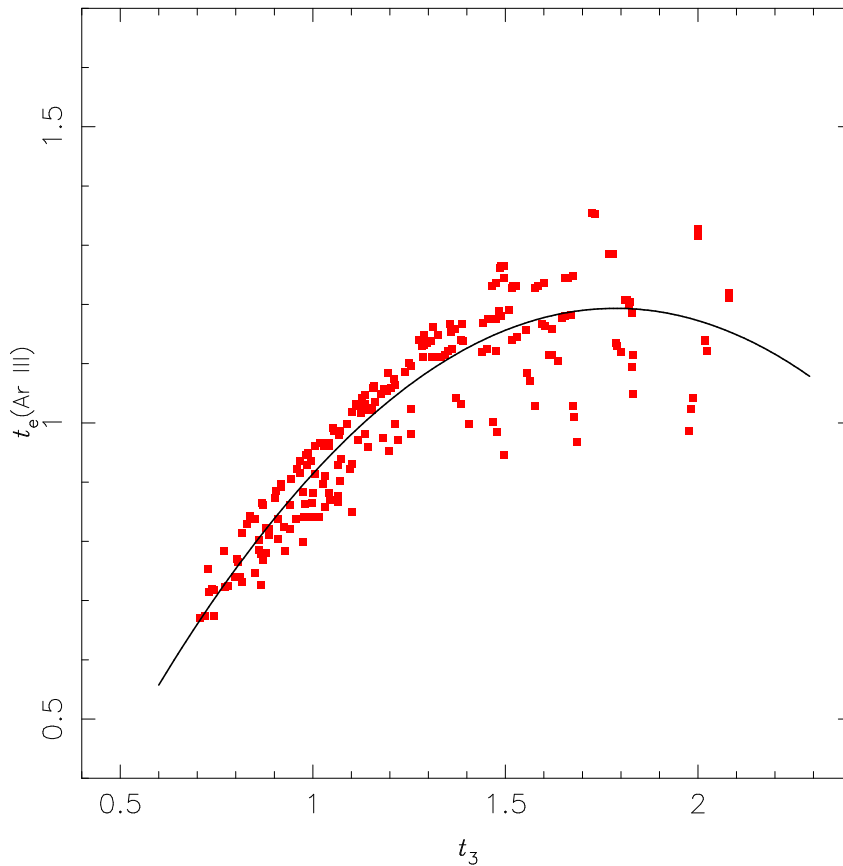
A fim de estimar uma temperatura  $T_e$  mais precisa para derivar a abundância iônica  $\text{Ar}^{2+}/\text{H}^+$ , os modelos de fotoionização de Carvalho *et al.* (2020) foram utilizados para

Figura 8 – Valores de temperatura para  $S^{2+}$ ,  $Ar^{2+}$  e  $O^{2+}$  preditos por modelos de fotoionização construídos por [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#) usando o código CLOUDY ([FERLAND \*et al.\*, 2013](#)). Os valores correspondem à média das temperaturas preditas pelos modelos (em unidades de  $10^4$  K) para cada íon sobre o raio nebuloso do AGN pesados pela densidade eletrônica. Painel inferior: valores de temperatura para  $S^{2+}$  versus aqueles para  $Ar^{2+}$ . A linha preta corresponde a igualdade entre as temperaturas (Eq. 27) proposta por [Garnett \(1992\)](#) para regiões H II. Os pontos vermelhos representam os resultados dos modelos de fotoionização. Painel superior: o mesmo que o painel inferior mas para  $S^{2+}$  versus  $t_3$ , onde  $t_3$  representa a temperatura para  $O^{2+}$ . A linha preta representa a Eq. 28 proposta por [Garnett \(1992\)](#).



Fonte: Carvalho *et al.* (2020)

Figura 9 – O mesmo que a Figura 8 mas para  $T_e(\text{Ar III})$  versus  $t_3$ . A curva preta representa o ajuste aos pontos representado pela Eq. 29.



Fonte: Carvalho *et al.* (2020)

obter uma relação entre  $T_e(\text{Ar III})$  e  $t_3$ , como mostrado na Figura 9. Como reportado acima, valores de  $t_3$  podem ser derivados diretamente da razão de linhas observadas  $RO3$  da nossa amostra. Na Figura 9,  $t_e(\text{Ar III})$  corresponde ao valor de  $T_e(\text{Ar III})$  em unidades de  $10^4$  K. Pode-se notar na Figura 9 que há uma boa correlação entre as temperaturas e um ajuste aos pontos resulta em

$$t_e(\text{Ar III}) = (-0.45 \pm 0.03) \times t_3^2 + (1.61 \pm 0.09) \times t_3 - (0.24 \pm 0.06). \quad (29)$$

A abundância iônica  $\text{Ar}^{2+}/\text{H}^+$  é então calculada pela expressão

$$12 + \log\left(\frac{\text{Ar}^{2+}}{\text{H}^+}\right) = \log\left(\frac{I[\text{Ar III}]\lambda 7135}{I(\text{H}\beta)}\right) + 6.100 + \frac{0.86}{t_e(\text{Ar III})} - 0.404 \times \log t_e(\text{Ar III}). \quad (30)$$

### 2.2.2.2.1 ICF para $\text{Ar}^{2+}$

Para calcular a abundância total de argônio em relação a do hidrogênio ( $\text{Ar}/\text{H}$ ) usando apenas a abundância de  $\text{Ar}^{2+}/\text{H}^+$  é necessário usar um ICF para considerar a presença de íons com graus de ionização diferentes que  $\text{Ar}^{2+}$ . De fato, íons como  $\text{Ar}^{3+}$  and  $\text{Ar}^{4+}$  possuem linhas de emissão (e.g.,  $[\text{Ar IV}]\lambda 4740$ ,  $[\text{Ar V}]\lambda 7006$ ) presentes em espectros ópticos de AGNs (e.g., KOSKI, 1978; ALLOIN *et al.*, 1992). Até o momento, nenhum ICF foi proposto na literatura para determinações de abundância do argônio em AGNs e, em princípio, devido à estrutura de ionização distinta de AGNs, ICFs teóricos propostos para regiões H II (e.g., MATHIS, 1985; IZOTOV *et al.*, 2006; PÉREZ-MONTERO *et al.*, 2007; BERG *et al.*, 2020; AMAYO; DELGADO-INGLADA; STASIŃSKA, 2021) não podem ser aplicados a esta classe de objeto. Nesse sentido, utilizamos os modelos de fotoionização de Carvalho *et al.* (2020) para derivar um ICF de argônio definido por

$$\text{ICF}(\text{Ar}^{2+}) = \frac{\text{Ar}/\text{H}}{\text{Ar}^{2+}/\text{H}^+} \quad (31)$$

e em termos da função de razão da abundância iônica

$$x = \frac{\text{O}^{2+}}{\text{O}^+ + \text{O}^{2+}}. \quad (32)$$

Diversos autores têm propostos ICFs em função de  $x$  ou razões semelhantes (e.g.  $\text{O}^{2+}/\text{O}^+$ ), tanto para regiões H II (BERG *et al.*, 2020) como para AGNs (ARMAH *et al.*, 2021).

Na Figura 10 os resultados dos modelos de fotoionização para  $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+})$  versus  $x$  são mostrados. Um ajuste aos pontos produz a relação dada por

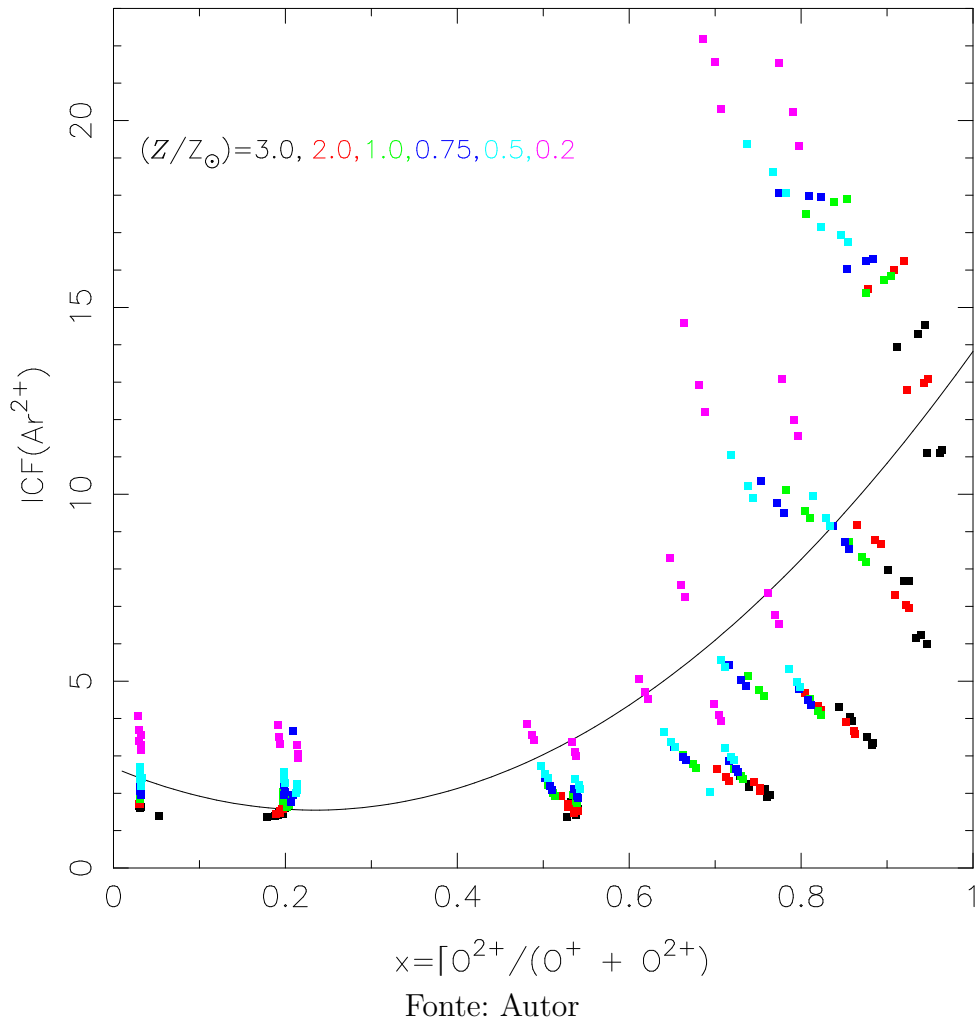
$$\text{ICF}(\text{Ar}^{2+}) = (a x^2) + (b x) + c, \quad (33)$$

sendo  $a = 20.88 \pm 3.80$ ,  $b = -9.74 \pm 3.64$  e  $c = 2.68 \pm 0.69$ . Apesar da relação acima ser obtida, pode-se ver na Figura 10 uma grande dispersão dos pontos. Investigamos a origem dessa dispersão como sendo devido à variação nos parâmetros nebulares  $N_e$ ,  $\alpha_{ox}$  (inclinação da Distribuição de Energia Espectral, SED <sup>3</sup>) e parâmetro de ionização  $U$ . Não encontramos nenhuma dependência desses parâmetros com a relação  $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+})$ - $x$  (esta análise não é apresentada no texto). No entanto, encontramos uma dependência entre a relação  $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+})$ - $x$  com a metalicidade do gás, como é notado na Figura 10, no sentido de que para um valor fixo de  $x$ , derivamos um valor de ICF mais alto com a diminuição da metalicidade. Uma dependência entre a metalicidade e  $\text{ICF}$ - $x$  para elementos distintos também foi derivada por Izotov *et al.* (2006) para SFs.

Com o objetivo de obter uma derivação mais exata do  $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+})$ , produzimos uma função biparamétrica, ou seja,  $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+}) = f [12 + \log(\text{O}/\text{H}), x]$ . A metalicidade ( $Z$ )

<sup>3</sup> Ver (KRABBE *et al.*, 2021) para uma descrição detalhada deste SED.

Figura 10 – ICF para  $\text{Ar}^{2+}$  (como definido na Eq. 31) versus a razão de abundância  $x = [\text{O}^{2+}/(\text{O}^+ + \text{O}^{2+})]$ . Pontos representam os resultados dos modelos de fotoionização construídos por [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#). Os resultados dos modelos que assumem diferentes metalicidades (em relação à metalicidade solar) são indicados por cores diferentes. A curva representa o ajuste a todos os pontos dados pela Eq. 33.

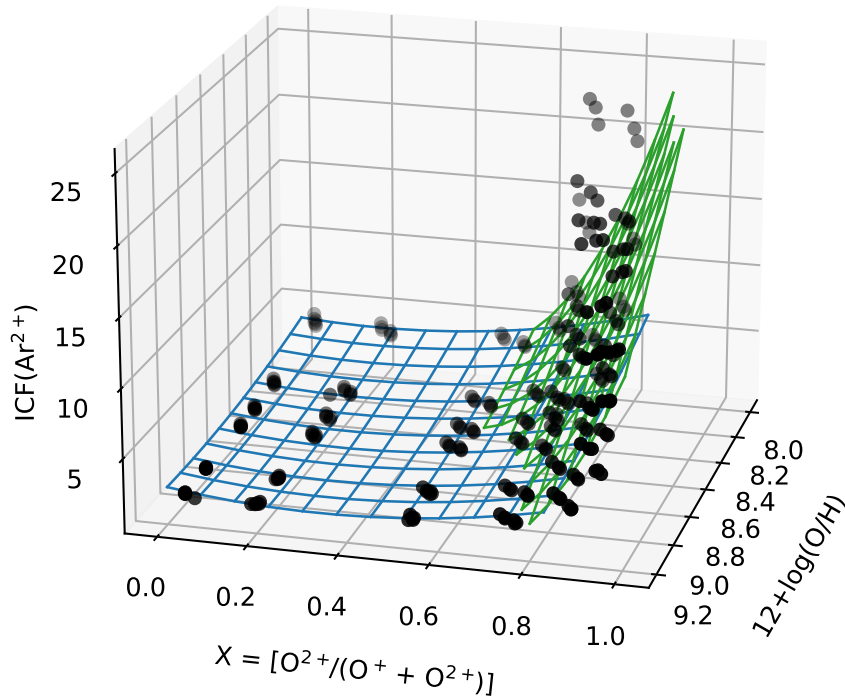


assumida nos modelos de fotoionização foi convertida em abundância de oxigênio utilizando a expressão

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 12 + \log[(Z/Z_{\odot}) \times 10^{\log(\text{O}/\text{H})_{\odot}}], \quad (34)$$

sendo  $\log(\text{O}/\text{H})_{\odot} = -3.31$  ([PRIETO; LAMBERT; ASPLUND, 2001](#)). Na Figura 11 a calibração biparamétrica é mostrada onde os pontos representam os resultados dos modelos de fotoionização. Ajustamos duas funções, uma para  $x < 0.6$  representada por uma

Figura 11 – Calibração bi-paramétrica entre  $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+})$ ,  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  e  $x = [\text{O}^{2+}/(\text{O}^+ + \text{O}^{2+})]$ . Pontos representam os resultados dos modelos de fotoionização contruídos por [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#) enquanto as superfícies representam o melhor ajuste dos pontos. A superfície azul é dada pela Eq. 35 e válida para  $x < 0.6$  enquanto que a superfície verde, dada pela Eq. 36, é valida para  $x > 0.6$ .



Fonte: Autor

superfície azul na Figura 11 e dada por

$$\begin{aligned} \text{ICF}(\text{Ar}^{2+}) &= (1.51 \pm 0.3)x^2 - (6.82 \pm 1.55)y^2 \\ &- (1.68 \pm 0.52)xy - (27.18 \pm 5.19)x \\ &+ (10.88 \pm 4.72)y + 124.6 \pm 22.32 \end{aligned} \quad (35)$$

sendo  $y = 12 + \log(\text{O}/\text{H})$  e  $x = [\text{O}^{2+}/(\text{O}^+ + \text{O}^{2+})]$  e a outra para  $x > 0.6$  representada pela superfície verde e dada por

$$\begin{aligned} \text{ICF}(\text{Ar}^{2+}) &= (1.82 \pm 142.29)x^2 + (107.86 \pm 21.07)y^2 \\ &- (35.61 \pm 7.13)xy - (14.54 \pm 33.81)x \\ &+ (188 \pm 53.96)y + 27.73 \pm 142.29. \end{aligned} \quad (36)$$

As expressões acima foram aplicadas para derivar a abundância total do argônio

em relação ao do hidrogênio (Ar/H) para cada objeto de nossa amostra. Os erros médios para as abundâncias  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$  e  $12+\log(\text{O}/\text{H})$  derivados para a amostra são  $\sim 0,25$  dex e  $\sim 0,13$  dex, respectivamente. Esses erros são da ordem daqueles derivados para determinações de abundância de O/H em AGNs obtidos por [Revalski et al. \(2018a, 2018b, 2021\)](#), que também aplicaram o método- $T_e$ . No entanto, eles são um pouco ( $\sim 0.1$  dex) maiores do que aqueles derivados para regiões H II localizadas no disco de galáxias espirais próximas (e.g., [BERG et al., 2020](#)). Isso ocorre devido à linha auroral [O III] $\lambda 4363$ , utilizada no cálculo de  $t_3$ , ser mais fraca em AGNs do que em regiões H II, resultando em uma incerteza maior em unidades de fluxo, que por sua vez implica uma maior incerteza nos valores de abundância em AGNs.

Na Tabela 1, estão listadas as identificações dos objetos da amostra, os valores derivados da temperatura e densidade eletrônica, valores do ICF do argônio, abundância iônica e total, *redshift* ( $z$ ) e massa estelar das galáxias hospedeiras de cada AGN. Os valores de  $z$  e massa das galáxias são os listados pelo grupo MPA/JHU.

Tabela 1 – Resultados obtidos de nossa amostra de objetos. Colunas: (1) nome SDSS, (2)  $T_e(\text{O III})$  (em K), (3)  $T_e(\text{A III})$  (em K), (4) Densidade eletrônica (em unidades de  $\text{cm}^{-3}$ ), (5) ICF( $\text{Ar}^{2+}$ ), (6)  $12 + \log(\text{O}^+/\text{H}^+)$ , (7)  $12 + \log(\text{O}^{2+}/\text{H}^+)$ , (8)  $12 + \log(\text{A}^{2+}/\text{H}^+)$ , (9)  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ , (10)  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$ , (11) *redshift* e (12) Massa (em unidades de  $10^7 M_\odot$ ).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
J101754.72-002811.9	14510	11481	298	2.79	8.03	7.87	5.98	8.34	6.43	0.1817	11.13
J101536.21+005459.3	18252	11994	184	2.14	8.39	7.78	5.60	8.56	5.93	0.1202	10.71
J104426.16+001707.3	8872	8343	292	2.40	8.30	8.41	6.31	8.74	6.69	0.1502	10.71
J105408.69-000111.0	16992	11971	227	2.39	8.42	7.33	5.36	8.53	5.74	0.1081	10.21
J111652.97+010615.5	16865	11952	259	2.84	8.05	7.49	5.54	8.23	6.00	0.1309	10.70
J114017.31-001543.3	13459	10677	505	2.46	8.17	7.99	6.09	8.47	6.48	0.1245	10.62
J113049.84+005346.7	19873	11827	600	2.35	8.37	7.49	5.62	8.50	5.99	0.1043	10.70
J113326.76+001443.9	14509	11386	497	2.61	8.16	7.54	5.62	8.33	6.03	0.1143	10.48
J115616.76-002221.0	15385	11724	781	2.16	8.31	7.96	6.40	8.55	6.74	0.1092	10.74
J122012.58-010531.5	11277	10039	1443	2.18	8.39	8.43	6.24	8.79	6.58	0.1183	10.55
J123441.93-010034.7	14568	11518	381	2.52	8.15	7.75	5.55	8.37	5.95	0.0801	10.25
J124116.14+004423.0	14438	11537	659	2.24	8.26	8.02	5.90	8.54	6.26	0.0900	10.74
J130433.90+000402.9	16195	11896	158	2.56	8.19	7.53	5.92	8.35	6.33	0.2463	11.23
J132625.73-002148.6	17204	11988	273	2.89	8.10	7.25	5.53	8.24	5.99	0.1893	10.78
J134005.97-010646.4	20688	11681	189	2.35	8.48	7.29	5.43	8.59	5.81	0.1295	10.77
J133821.79+002329.2	12623	10797	233	2.60	8.17	8.25	6.14	8.59	6.55	0.1292	10.87
J140301.05+005343.5	14002	11329	155	3.03	7.94	7.65	5.51	8.20	5.99	0.1664	10.61
J145956.36-002821.5	12503	10682	202	2.57	8.13	8.01	6.14	8.45	6.55	0.1096	10.84
J130354.71-030631.8	11344	10073	757	1.84	8.53	8.40	6.28	8.85	6.55	0.0778	10.65
J171544.02+600835.4	17771	12000	819	2.14	8.38	7.79	5.59	8.56	5.92	0.1569	10.98

*Continua na próxima página*

Tabela 1 – *Continuação da página anterior*

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
J172028.98+584749.6	14587	11494	494	2.92	8.03	7.42	5.29	8.21	5.75	0.1269	10.84
J172352.43+582318.5	17778	11997	939	2.91	8.07	7.31	5.20	8.22	5.66	0.0799	10.24
J153035.77+001517.7	11505	10165	207	2.28	8.24	7.93	5.87	8.50	6.23	0.0721	10.53
J002312.34+003956.3	19764	11869	447	2.06	8.54	7.73	5.67	8.68	5.98	0.0727	10.16
J012937.25-003838.6	14176	11401	141	2.57	8.16	7.60	5.51	8.34	5.92	0.1794	11.06
J012720.32+010214.6	9838	9066	498	2.27	8.41	8.55	6.36	8.87	6.72	0.1745	11.09
J013957.81-004504.2	11872	10381	441	2.74	8.11	8.18	6.40	8.52	6.83	0.1616	10.83
J014153.97+010505.4	19553	11866	581	2.23	8.40	7.62	5.33	8.55	5.68	0.1013	10.95
J011016.00+150515.9	12920	10890	534	2.28	8.27	8.19	6.10	8.61	6.46	0.0597	10.19
J013555.82+143529.6	12902	10883	267	2.52	8.14	7.86	5.68	8.40	6.08	0.0719	10.83
J074213.71+391705.3	10451	9509	201	2.40	8.22	8.19	6.19	8.59	6.57	0.0704	9.94
J082017.99+465125.3	12773	10823	130	2.13	8.46	7.70	5.64	8.61	5.97	0.0524	10.35
J082910.18+504005.7	11671	10220	205	2.00	8.44	7.92	5.91	8.64	6.21	0.0739	9.99
J085223.96+531550.6	17610	11995	524	2.52	8.27	7.40	5.54	8.41	5.94	0.1280	10.78
J095123.44+581621.2	18905	11952	140	2.45	8.48	6.96	5.12	8.58	5.51	0.1486	10.91
J033923.14-054841.5	12841	10856	331	2.54	8.16	8.13	5.86	8.52	6.27	0.0848	10.26
J091605.16+002030.3	12682	10791	482	1.83	8.53	8.14	5.77	8.76	6.03	0.1434	10.97
J093509.12+002557.4	15921	11833	551	2.70	8.11	7.52	5.24	8.29	5.68	0.1512	10.78
J100013.84+624703.4	10996	9868	488	2.55	8.15	8.09	5.96	8.50	6.37	0.1145	10.33
J102039.81+642435.8	15695	11779	172	2.29	8.25	7.86	5.47	8.47	5.83	0.1223	10.74
J095759.45+022810.5	12988	10905	325	2.35	8.23	8.11	6.12	8.55	6.49	0.1194	10.56
J100921.26+013334.5	13197	11029	735	2.20	8.32	8.27	6.04	8.68	6.39	0.1437	10.72
J112748.89+020302.6	16053	11845	451	2.25	8.30	7.76	5.53	8.49	5.88	0.1267	10.80
J114304.62+013946.2	10858	9810	197	2.03	8.38	8.04	5.94	8.62	6.25	0.0928	10.84
J114029.55+022744.6	20626	11680	375	2.48	8.28	7.44	5.23	8.42	5.62	0.1230	10.63
J115854.96+033254.9	15449	11741	373	2.27	8.36	7.63	5.41	8.51	5.77	0.0841	10.51
J125503.63+012233.7	13282	11026	731	2.09	8.37	8.25	5.94	8.69	6.26	0.1642	10.93
J125209.68+021558.0	15928	11815	200	2.53	8.28	7.38	5.26	8.41	5.66	0.2064	10.95
J130220.35+024048.8	13312	11045	710	2.33	8.23	7.85	5.98	8.46	6.35	0.1766	10.93
J134959.37+030058.0	14538	11545	346	2.25	8.26	7.97	6.17	8.52	6.52	0.1097	10.35
J140231.58+021546.3	11109	9934	263	2.03	8.44	8.42	6.07	8.81	6.38	0.1797	11.06
J143214.54+023228.5	15605	11787	439	2.31	8.26	7.77	5.58	8.46	5.95	0.1123	10.91
J074257.23+333217.9	14084	11333	366	2.77	8.05	7.66	5.53	8.27	5.97	0.1474	10.71
J090246.69+520932.8	13797	11254	290	2.34	8.22	8.02	5.70	8.51	6.07	0.1375	10.95
J141530.97+035916.6	16651	11928	463	2.41	8.40	7.31	5.56	8.52	5.95	0.0805	10.49
J141351.75+042208.9	16889	11957	293	2.47	8.23	7.57	5.41	8.40	5.80	0.1449	10.60
J144925.29+044157.2	9467	8810	126	1.91	8.46	8.15	6.14	8.71	6.42	0.0824	10.04
J151244.15+042848.3	14481	11439	575	2.37	8.23	7.73	5.66	8.43	6.04	0.0796	10.34
J155404.39+545708.2	12320	10609	147	2.48	8.20	8.20	6.00	8.58	6.39	0.0457	9.91
J164938.71+420658.4	14941	11624	345	2.34	8.30	7.63	5.61	8.46	5.98	0.1503	10.58
J165944.29+392846.1	16801	11947	285	2.32	8.32	7.62	5.78	8.48	6.15	0.0818	10.09
J100602.50+071131.8	14649	11535	1588	1.87	8.64	7.95	5.76	8.80	6.04	0.1205	11.19
J163344.99+372335.1	20228	11735	771	2.50	8.21	7.57	5.54	8.38	5.94	0.1748	10.80
J125558.75+291459.4	11324	10055	366	2.00	8.44	8.36	6.21	8.78	6.51	0.0681	9.91



## 2.3 Resultados e Discussão

A abundância total do argônio em relação ao hidrogênio (Ar/H) em nebulosas gasosas tem sido derivada utilizando o método- $T_e$  por décadas. Estas derivações têm sido obtidas principalmente por meio de medidas da razão de linhas [Ar III] $\lambda$ 7135/H $\beta$ , ou seja, Ar/H tem sido derivado por meio da razão de abundância iônica Ar<sup>2+</sup>/H<sup>+</sup> e ICFs (e.g., KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003). Em alguns poucos casos, também é possível medir as linhas de emissão [Ar IV] $\lambda$ 4740 e [Ar V]  $\lambda$ 7006 e, conseqüentemente, derivar as abundâncias iônicas Ar<sup>3+</sup>/H<sup>+</sup> e Ar<sup>4+</sup>/H<sup>+</sup>, respectivamente (e.g., KOSKI, 1978; FRENCH, 1981; PAGOMENOS; BERNARD-SALAS; POTTASCH, 2018), produzindo uma determinação Ar/H mais exata, ou seja,

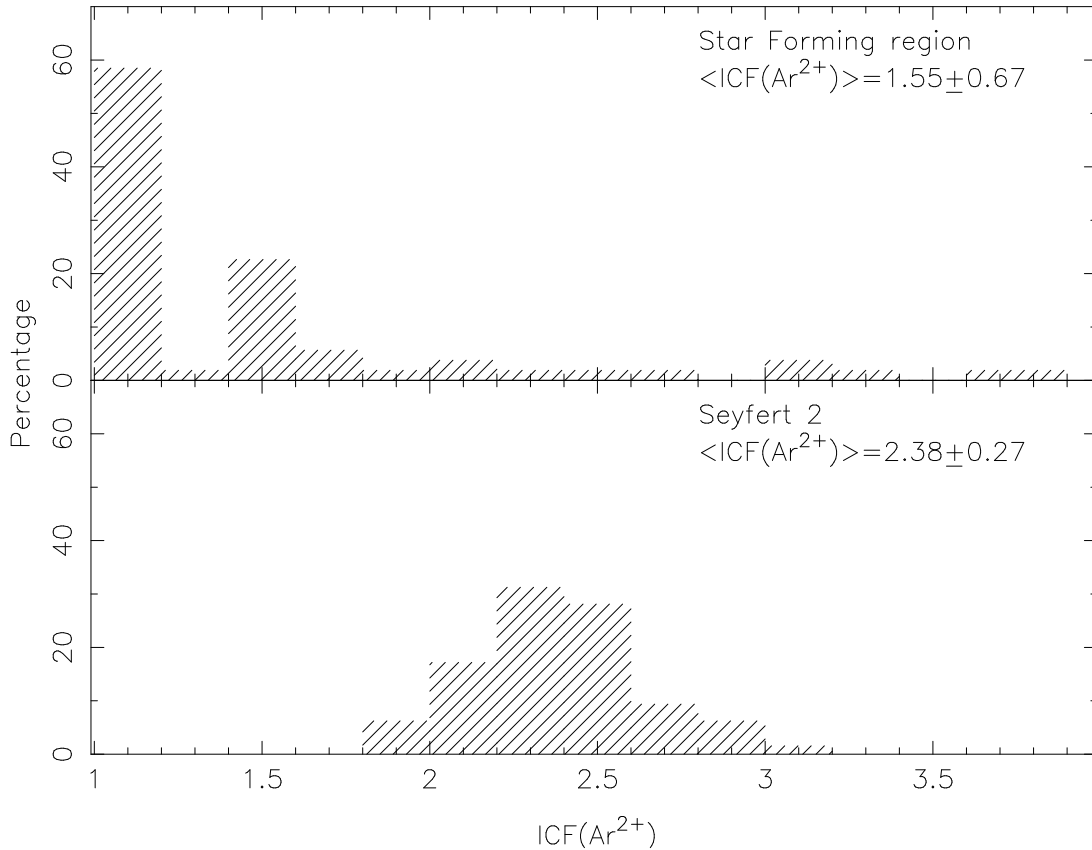
$$\frac{\text{Ar}}{\text{H}} = \text{ICF}(\text{Ar}) \times \left[ \frac{\text{Ar}^{2+}}{\text{H}^+} + \frac{\text{Ar}^{3+}}{\text{H}^+} + \frac{\text{Ar}^{4+}}{\text{H}^+} \right] \quad (37)$$

(e.g., WESSON; LIU; BARLOW, 2005). No entanto, as linhas [Ar IV] $\lambda$ 4740 e [Ar V] $\lambda$ 7006 são fracas na maior parte dos espectros de objetos com baixa ionização, portanto, é mais conveniente usar apenas [Ar III] $\lambda$ 7135; que é observada geralmente com um mais alto sinal/ruído que as outras linhas supracitadas (e.g., KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003; ZURITA; BRESOLIN, 2012). No nosso caso, as medidas das linhas disponibilizadas pelo grupo MPA/JHU apenas nos permitem derivar abundância iônica Ar<sup>2+</sup>/H<sup>+</sup> e, após, aplicar o ICF (Eq. 35) para obter a abundância total de argônio (Ar/H).

A aplicação do método- $T_e$  na determinação de abundâncias químicas de AGNs foi recentemente proposta por Dors *et al.* (2020) e o ICF para o argônio, proposta no presente estudo, é o primeiro para esta classe de objetos. Assim, é válido analisar os valores derivados do ICF para nossa amostra, bem como compará-los com valores derivados para SFs. Na Figura 12, painel inferior, a distribuição dos valores do ICF do argônio derivados para a nossa amostra utilizando a Eq. 35 é mostrada. Nós derivamos valores ICF variando de  $\sim 1.8$  a  $\sim 3$ , com um valor médio de  $2,38 \pm 0,27$ . Também na Figura 12, painel superior, é mostrado a distribuição do ICF do argônio [i.e., valores de ICF(Ar<sup>2+</sup>)] para 53 SFs (49 regiões H II localizadas em discos de galáxias em espiral e 4 galáxias H II) compiladas da literatura. Notamos que a maioria das SFs apresentam ICFs mais baixos em comparação com aqueles derivados para nossa amostra de núcleos Seyfert 2, o que implica que  $\sim 90\%$  das SFs têm  $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+}) \lesssim 2$  e um valor médio de cerca de 1,5. Esses resultados mostram o fato conhecido que a fase de gás em Seyfert 2 tem um grau de ionização mais alto do que aquele em SFs.

Em relação às estimativas de abundância, nossos resultados para núcleos Seyfert 2 podem ser usados para verificar uma possível produção estelar secundária de argônio no regime de metalicidade muito alta [ $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 8.8$ ], uma vez que o valor máximo derivado para SFs utilizando o método- $T_e$  é de  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 8.7$  (e.g., KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003; BERG *et al.*, 2020; YATES *et al.*, 2020). Na Figura 13,

Figura 12 – Painel inferior. distribuição de valores de ICF para o argônio de nossa amostra de núcleos Seyfert 2 (ver Seção. 2.2.1) derivada usando as Eqs. 35 e 36. O valor médio é indicado. Painel Superior: O mesmo para o painel inferior mas para ICFs de SFs (regiões H II e galáxias H II) derivados por Berg *et al.*, (2015, 2020), Croxall *et al.*, (2015, 2016), Bresolin *et al.* (2009), Hägele *et al.* (2008), e Lee e Skillman (2004).



Fonte: Autor

a abundância total de argônio [em unidades de  $12 + \log(\text{Ar}/\text{H})$ ] versus o abundância de oxigênio [em unidades de  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ ] de nossa amostra de núcleos Seyfert 2 é apresentada. Também nesta figura, os resultados de abundâncias derivados utilizando o método- $T_e$  para núcleos de galáxias com formação estelar derivados por Izotov *et al.* (2006) (cujos dados observacionais também foram compilados do SDSS, Abazajian *et al.*, 2005) e para galáxias H II, obtidos por Hägele *et al.* (2008), são mostrados. Neste caso, preferimos comparar nossos resultados apenas com aqueles para galáxias com formação estelar (excluindo regiões H II isoladas) porque esses objetos estão sujeitos a processos físicos semelhantes àqueles em AGNs, tais como:

1. SFs e AGNs podem apresentar *outflows* (e.g., HOPKINS *et al.*, 2012; HIRSCHMANN *et al.*, 2013; CHISHOLM *et al.*, 2017; RIFFEL; STORCHI-BERGMANN; RIFFEL, 2014; RIFFEL *et al.*, 2021; RIFFEL, 2021; COUTO *et al.*, 2021) e
2. no caso de galáxias espirais, a presença de barras pode produzir uma acreção de

gás pobre em metais nas regiões centrais e provenientes de regiões externas do disco (e.g., [ATHANASSOULA, 1992](#)).

Esses processos podem regular a formação de estrelas, modificar o enriquecimento de gás (e.g., [OPPENHEIMER et al., 2010](#); [KRUMHOLZ; KRUIJSSEN; CROCKER, 2017](#); [SU et al., 2017](#); [JAMES et al., 2020](#)) e podem não estar presentes em regiões H II isoladas. Na Figura 13, pode-se notar uma relação linear entre Ar/H e O/H, indicando uma produção primária do argônio em um amplo regime de metalicidade. Um ajuste aos pontos (considerando Seyfert 2 e SFs) produz a expressão

$$12 + \log(\text{Ar}/\text{H}) = [(0.89 \pm 0.01) \times 12 + \log(\text{O}/\text{H})] - (1.50 \pm 0.15), \quad (38)$$

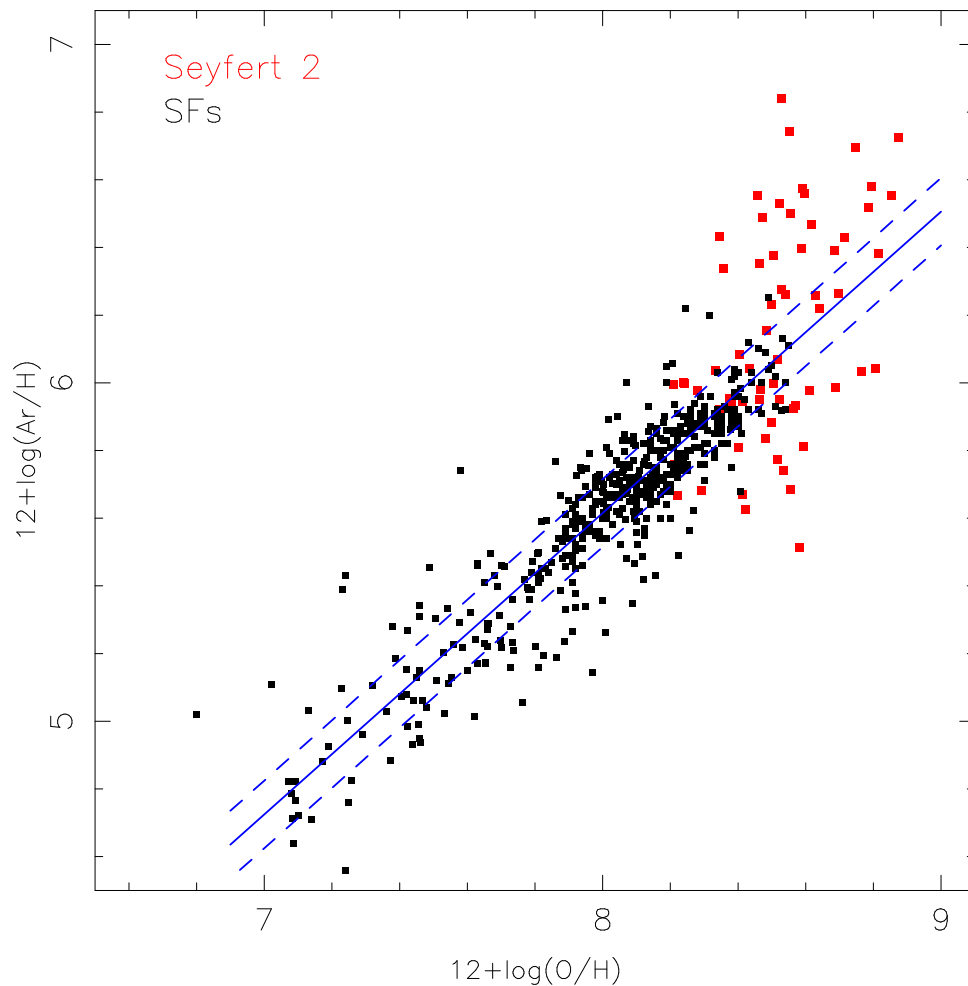
representado na Figura 13 por uma linha azul sólida. As linhas tracejadas nesta figura representam a incerteza de  $\pm 0,1$  dex nas estimativas de abundância (e.g., [KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003](#)). Na Figura 13, pode-se notar que para valores de O/H muito altos, é observado um leve desvio dos pontos representando AGNs em relação a reta representada pela Eq. 38. Isso pode ser uma indicação de uma produção secundária de argônio em regime de metalicidade muito alta, ou seja,  $(\text{Ar}/\text{H}) \propto (\text{O}/\text{H})^2$ . Em vista disso, testamos vários ajustes polinomiais considerando diferentes limites para a abundância de oxigênio em busca de uma transição da produção de Ar primário para secundário, mas nenhuma solução satisfatória foi obtida. Portanto, enfatizamos que nossos resultados para AGNs, quando combinados com aqueles de SFs, indicam que o argônio tem uma produção estelar primária em uma ampla faixa de metalicidade.

Os elementos pesados em AGNs são produzidos principalmente em regiões H II localizadas a poucos parsecs de distância do núcleo de galáxias (e.g., [BOER; SCHULZ, 1993](#); [ELMEGREEN et al., 2002](#); [DÍAZ et al., 2007](#); [DORS O. L. et al., 2008](#); [BÖKER et al., 2008](#); [RIFFEL et al., 2009](#); [HÄGELE et al., 2013](#); [ÁLVAREZ-ÁLVAREZ et al., 2015](#); [RIFFEL et al., 2016](#); [PILYUGIN et al., 2020](#); [MA et al., 2021](#)) e, em seguida, transportado para o buraco negro supermassivo. O enriquecimento químico de AGNs também podem ser obtido de duas formas:

1. formação de estrelas *in situ* dentro do disco de acreção do AGN (e.g., [COLLIN; ZAHN, 1999](#); [GOODMAN; TAN, 2004](#); [COLLIN; ZAHN, 2008](#); [WANG et al., 2011](#); [MAPELLI et al., 2012](#); [DAVIES; LIN, 2020](#); [CANTIELLO; JERMYN; LIN, 2021](#)) e por
2. captura de estrelas orbitando regiões centrais das galáxias (e.g., [SYER; CLARKE; REES, 1991](#); [ARTYMOWICZ; LIN; WAMPLER, 1993](#)).

Ambos processos podem produzir diferente evolução química de AGNs em comparação a de SFs. Por exemplo, a máxima abundância de oxigênio em núcleos de galáxias com

Figura 13 – Abundância total de argônio [em unidades de  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$ ] versus a abundância total de oxigênio [em unidades de  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ ]. Os pontos vermelhos representam os resultados da abundância de nossa amostra de Seyfert 2. Pontos pretos representam os resultados da abundância de galáxias H II obtidas através do método  $T_e$  por [Izotov \*et al.\* \(2006\)](#) e [Hägele \*et al.\* \(2008\)](#). A linha preta representa um ajuste dos pontos (Eq. 38) enquanto que as linhas tracejadas representa a incerteza de  $\pm 0.1$  dex em estimativas de abundância de regiões H II (e.g., [KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003](#)).



Fonte: Autor

SFs é  $12+\log(\text{O}/\text{H}) \sim 8.9$  (e.g., [PILYUGIN; THUAN; VÍLCHEZ, 2007](#)) enquanto núcleos Seyfert 2 podem alcançar até  $\sim 9,2$  dex (e.g., [DORS \*et al.\*, 2020](#); [DORS, 2021](#)), ou seja, há um enriquecimento adicional em Seyferts em comparação com SFs ricas em metais. Desta forma, determinar a abundância de metais em AGNs, no caso abundância de argônio, pode fornecer informações úteis a estudos sobre nucleossíntese estelar no regime de metalicidade muito alta.

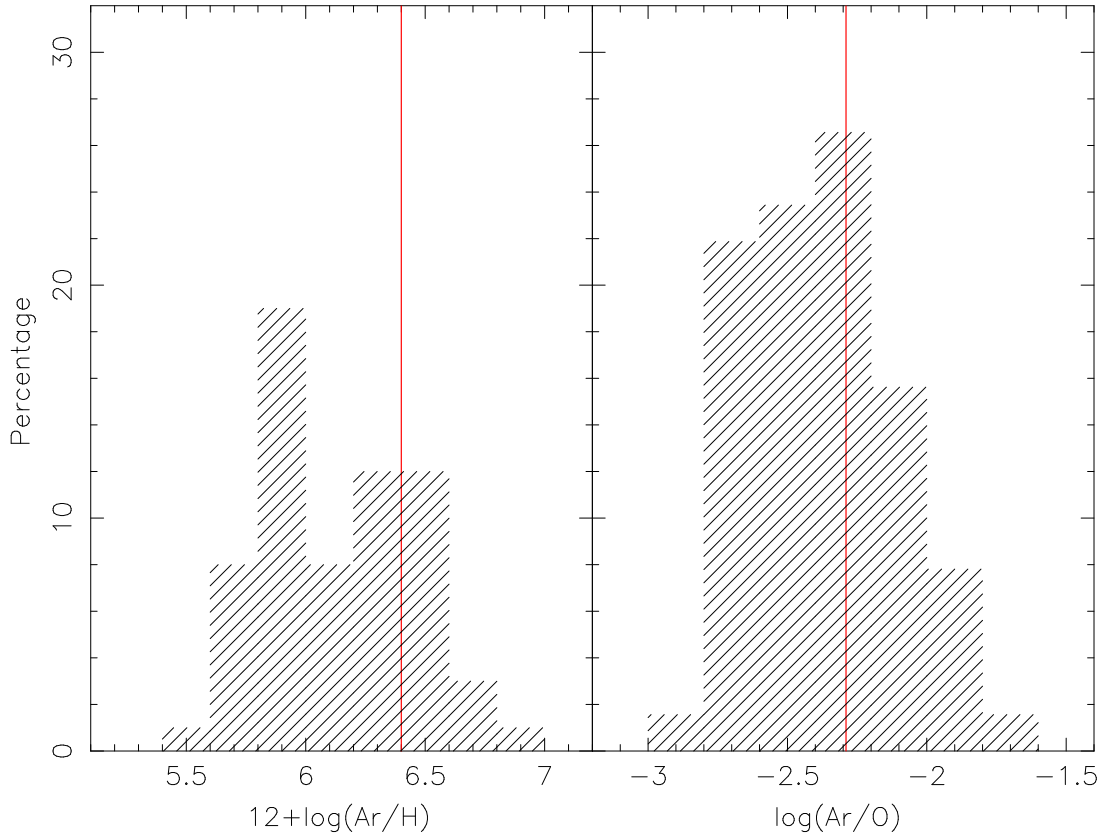
Neste sentido, é importante verificar a amplitude da abundância de Ar/H em AGNs, uma vez que esses objetos apresentam, em geral, maior metalicidade (ou abundância de O/H) do que a de SFs (e.g., [GROVES; HECKMAN; KAUFFMANN, 2006](#); [DORS \*et al.\*, 2020](#)). Na Figura 14, as distribuições de abundância de argônio [em unidades de  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$ ] e  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  para nossa amostra e o valor solar dessas abundâncias são mostrados. Na Tabela 2, os valores de abundância mínimo, máximo e médio, obtidos da Figura 14, bem como os valores de abundância de oxigênio (não mostrados na Figura 14) são listados. Também listamos na Tabela 2 os valores de abundância mínimo, máximo e médio ( $W_{v.}$ ) em relação ao valor solar, definido por

$$W_{v.}^X = X(v.)/X_{\odot}, \quad (39)$$

sendo X uma dada razão de abundância. A abundância solar de argônio e oxigênio são aquelas derivadas por [Grevesse e Sauval \(1998\)](#) e por [Prieto, Lambert e Asplund \(2001\)](#), respectivamente, i.e.  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})_{\odot} = 6.40$  e  $12+\log(\text{O}/\text{H})_{\odot} = 8.69$ . Pode-se inferir da Tabela 2 que os valores máximos da abundância de Ar/H e Ar/O em nossa amostra de AGNs são maiores do que os valores solares, i.e.  $\sim 2.7$  e  $\sim 4,0$  vezes os valores solares, respectivamente. No entanto,  $W_{\text{max.}}^{\text{Ar}/\text{H}}$  e  $W_{\text{max.}}^{\text{Ar}/\text{O}}$  podem até ser maiores do que os encontrados neste trabalho devido à amostra considerada. De fato, o  $W_{\text{max.}}^{\text{O}/\text{H}}$  derivado para nossa amostra é cerca de 1,5 vezes o valor solar. [Dors \*et al.\* \(2020\)](#) encontraram  $W_{\text{max.}}^{\text{O}/\text{H}} \sim 3.2$  após considerar uma amostra maior de núcleos Seyfert 2 do SDSS devido a não assumirem como critério de seleção a presença da linha de emissão [Ar III]. Assim, provavelmente existam valores ainda mais altos de Ar/H e Ar/O, superiores aos listados na Tabela 2.

Com o objetivo de comparar a faixa de abundância de Ar/H e Ar/O derivada utilizando a nova metodologia do método- $T_e$  para AGNs com aqueles obtidos por outros métodos, compilamos da literatura gradientes radiais de Ar/H e Ar/O derivados em galáxias espirais e calculados pelo método- $T_e$ . Estes gradientes são obtidos calculando a abundância química de regiões H II individuais situadas ao longo do raio de galáxias espirais, sendo que geralmente se encontra um decréscimo na abundância de qualquer elemento com o aumento da distância galactocêntrica ( $R$ ). Extrapolamos esses gradientes radiais para a parte central das galáxias espirais, ou seja, consideramos valores de abundâncias para a distância galactocêntrica  $R = 0$ . Esta metodologia permite inferir valores indiretos e independentes de abundâncias nos núcleos de galáxias espirais (e.g., [VILA-COSTAS; EDMUNDS, 1992](#); [ZEE \*et al.\*, 1998](#); [PILYUGIN; VÍLCHEZ; CONTINI, 2004](#); [ZINCENKO \*et al.\*, 2019a](#)).

Figura 14 – Painel esquerdo: distribuição da abundância de argônio [em unidades de  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$ ] para nossa amostra de núcleos Seyfert 2. A linha vermelha representa o valor da abundância solar [ $12 + \log(\text{Ar}/\text{H})_{\odot} = 6.40$ ] derivada por Grevesse e Sauval (1998). Painel direito: o mesmo que o painel esquerdo mas para  $\log(\text{Ar}/\text{O})$ . A linha vermelha representa o valor da abundância solar do argônio em relação a do oxigênio [ $\log(\text{Ar}/\text{O})_{\odot} = -2.29$ ] derivado por Grevesse e Sauval (1998) e Prieto, Lambert e Asplund (2001).



Fonte: Autor

Tabela 2 – Mínimo, máximo e média dos valores das razões de abundância de nossa amostra (ver Seção 2.2.1) derivados pelo método  $T_e$  adaptado para AGNs (ver Seção 2.2.2). Os valores de abundância são obtidos da distribuição apresentada na Figura 14. O  $W_{\min}^X$ ,  $W_{\max}^X$ , and  $W_{\text{mean}}^X$  são calculados da Eq. 39 e representam os valores de abundância relativa aos valores solares. As abundâncias solares do argônio e do oxigênio consideradas foram aquelas derivadas por Grevesse e Sauval (1998) e Prieto, Lambert e Asplund (2001), respectivamente.

Razões de abundância	Min.	Max.	média	$W_{\min}^X$	$W_{\max}^X$	$W_{\text{médio}}^X$
$12+\log(\text{Ar}/\text{H})$	5.51	6.84	$6.14 \pm 0.32$	0.13	2.75	$0.54^{+0.60}_{-0.27}$
$\log(\text{Ar}/\text{O})$	-3.06	-1.68	$-2.37 \pm 0.28$	0.16	3.98	$0.97^{+0.61}_{-0.53}$
$12+\log(\text{O}/\text{H})$	8.20	8.87	$8.52 \pm 0.16$	0.30	1.51	$0.67^{+0.30}_{-0.20}$

Tabela 3 – Parâmetros de gradiente de abundância radial derivados para as razões de abundância de Ar/H e Ar/O em uma amostra de galáxias espirais.  $N$  representa o número de regiões H II consideradas na estimativa do gradiente.  $Y_0$ ,  $grad Y$  e  $W_0$  são definidos nas Eqs. 40 e 41. Na última coluna estão listados os trabalhos originais dos quais os gradientes radiais foram compilados.

Object	$N$	$Y_0^{Ar/H}$	$grad Y^{Ar/H}$	$W_0^{Ar}$	$Y_0^{Ar/O}$	$grad Y^{Ar/O}$	$W_0^{Ar/O}$	Reference
NGC 5194	28	$6.55 \pm 0.12$	$-0.015 \pm 0.026$	$1.41^{+0.45}_{-0.33}$	$-2.22 \pm 0.11$	$+0.013 \pm 0.023$	$1.16^{+0.35}_{-0.24}$	(CROXALL <i>et al.</i> , 2015)
NGC 628	45	$6.77 \pm 0.55$	$-0.070 \pm 0.009$	$2.34^{+5.97}_{-1.66}$	$-1.92 \pm 0.04$	$-0.037 \pm 0.006$	$2.33^{+0.24}_{-0.19}$	(BERG <i>et al.</i> , 2015)
NGC 300	28	$6.32 \pm 0.03$	$-0.106 \pm 0.011$	$0.84^{+0.05}_{-0.03}$	$-2.24 \pm 0.03$	$-0.028 \pm 0.009$	$1.12^{+0.12}_{-0.07}$	(BRESOLIN <i>et al.</i> , 2009)
NGC 5457	16	$6.40 \pm 0.07$	$-0.020 \pm 0.003$	$1.00^{+0.17}_{-0.14}$	$-2.36 \pm 0.01$	$-0.008 \pm 0.002$	$0.84^{+0.03}_{-0.01}$	(KENNICUTT; BRESOLIN; GARNETT, 2003)

Utilizando a metodologia padrão, assumimos que os gradientes de abundância radial Ar/H e Ar/O são representados por

$$Y^X = Y_0^X + [grad Y^X \times R(\text{kpc})], \quad (40)$$

sendo que  $Y^X$  representa o valor da razão de abundância de X [ $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$  ou  $\log(\text{Ar}/\text{O})$ ],  $Y_0^X$  o valor extrapolado de X para o centro galáctico ( $R = 0$ ) e  $grad Y^X$  a inclinação do gradiente em unidades de dex kpc $^{-1}$ . Como reportado por Pilyugin, Vílchez e Contini (2004), a confiabilidade das determinações de gradiente de abundância é definida não apenas pelo número de objetos considerados mas também pela distribuição desses ao longo do raio galáctico. Logo, consideramos dados publicados da literatura para valores de abundância X derivados usando o método- $T_e$  de regiões H II localizadas a distâncias galactocêntricas em galáxias espirais com  $0.2 \lesssim (R/R_{25}) \lesssim 1$ . O termo  $R_{25}$  representa o raio isofotal, definido como sendo a distância galactocêntrica com brilho superficial na banda B band igual a 25 mag arcsec $^{-2}$ . Foi possível obter os gradientes de abundância de Ar/H e Ar/O em quatro galáxias espirais. Na Tabela 3, estão listados a identificação de cada galáxia, o número ( $N$ ) de regiões H II consideradas na derivação dos gradientes, os valores  $Y_0^X$  e  $grad Y^X$ , bem como, os autores que obtiveram os resultados de abundâncias. Também na Tabela 3, o valor de  $Y_0^X$  em relação ao valor solar, definido por

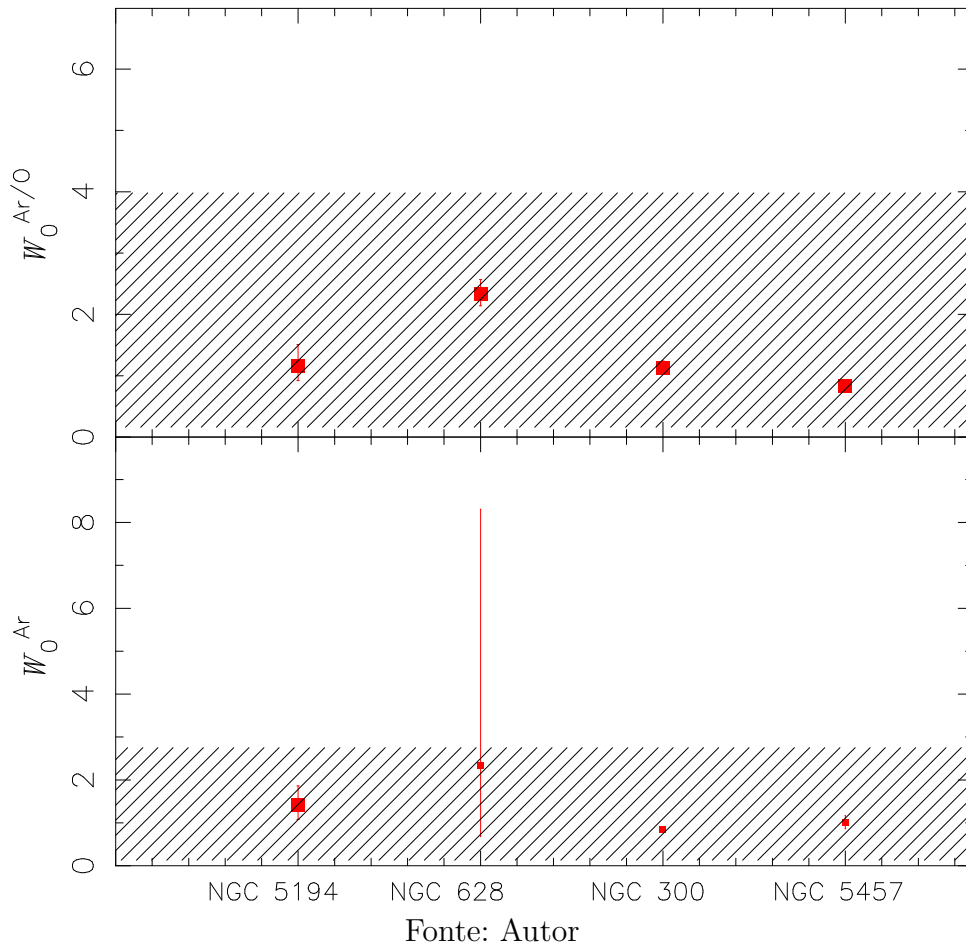
$$W_0^X = Y_0^X / (X)_\odot \quad (41)$$

está listado.

Na Figura 15, os valores  $W_0^X$  para as quatro galáxias espirais, listadas na Tabela 3, são representados por pontos vermelhos e comparados com o intervalo de valores (áreas hachuradas) derivados para nossa amostra e listados na Tabela 2. Pode-se ver os intervalos de abundância para a nossa amostra estão em acordo com os valores obtidos utilizando os gradientes radiais. Obviamente, uma comparação mais exata seria obtida se ambas abundâncias de argônio nos AGNs e o gradiente radial de abundância do argônio nas galáxias hospedeiras correspondentes fossem determinados. Semelhante estudo foi realizado para o oxigênio por Storchi-Bergmann *et al.* (1998) e Dors *et al.* (2015).

Finalmente, na Figura 16, nossas estimativas para abundâncias em Seyfert 2 (pontos vermelhos) para (Ar/O) versus (O/H) e aquelas calculadas utilizando o método-

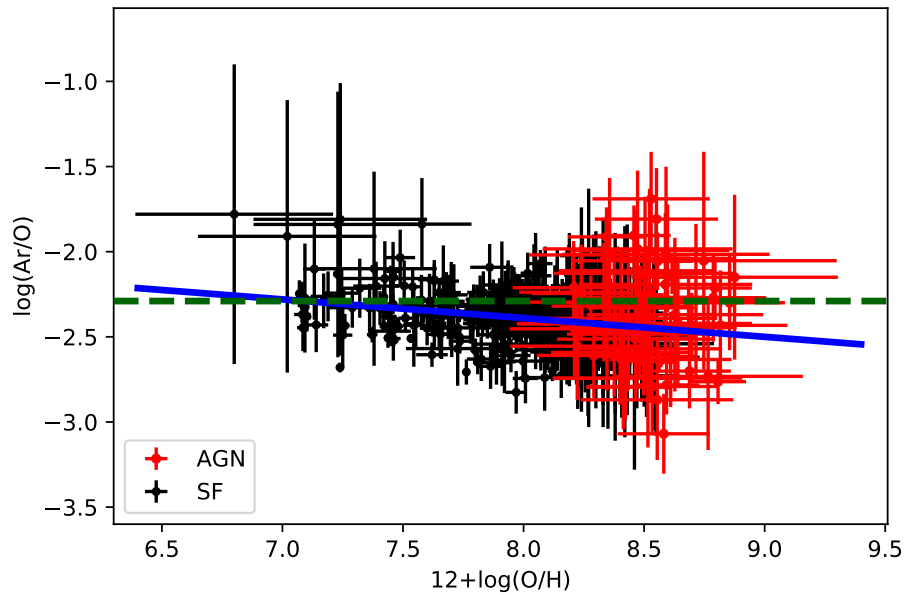
Figura 15 – Comparação entre as abundâncias de argônio em relação aos valores solares para  $W_0^{\text{Ar}} = (\text{Ar})/(\text{Ar})_{\odot}$  (painel inferior) e  $W_0^{\text{Ar/O}} = (\text{Ar/O})/(\text{Ar/O})_{\odot}$  (painel superior). Pontos representam estimativas da abundância radial por extrapolação para a parte da região central de galáxias espirais (distância galactocêntrica  $R = 0$ ) listados na Tabela 3 e indicados na figura. As áreas hachuradas representam a faixa de valores de abundância derivados da nossa amostra de Seyfert 2 listados na Tabela 2.



$T_e$  para galáxias H II por Izotov *et al.* (2006) e por Hägele *et al.* (2008) são mostradas. Estudos utilizando SFs têm produzido resultados conflitantes sobre (Ar/O) versus (O/H). Por exemplo, Izotov *et al.* (2006), corrigindo a abundância de oxigênio em grãos de poeira (da ordem de  $\sim 0.1$  dex), encontraram uma inclinação negativa para Ar/O versus O/H no intervalo  $7.1 \lesssim [12 + \log(\text{O}/\text{H})] \lesssim 8.6$ , que corresponde ao intervalo de metalicidade  $0.03 \lesssim (Z/Z_{\odot}) \lesssim 0.7$ . Esta inclinação negativa é fortemente influenciada por estimativas em objetos com metalicidade muito baixa  $[12 + \log(\text{O}/\text{H})] \lesssim 7.5$ . Embora este resultado esteja de acordo com o encontrado por Pérez-Montero *et al.* (2007)<sup>4</sup> (i.e., Ar/O diminuí com o aumento de O/H), esses autores derivaram valores de abundância de Ar/O aproximadamente igual ao valor solar para objetos no regime de baixa metalicidade

<sup>4</sup> Pérez-Montero *et al.* (2007) consideraram resultados de abundância de regiões H II isoladas e galáxias H II.

Figura 16 – Relação entre  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  e  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ . Pontos vermelhos representam estimativas para nossa amostra de Seyfert 2 enquanto pontos pretos representam valores compilados de estimativas para galáxias H II derivados por [Izotov \*et al.\* \(2006\)](#) e [Hägele \*et al.\* \(2008\)](#). A linha azul representa a regressão linear dos pontos dada pela equação Eq. 42. A linha verde tracejada representa o valor solar,  $\log(\text{Ar}/\text{O})_{\odot} = -2.29$ , derivado por [Grevesse e Sauval \(1998\)](#) and [Prieto, Lambert e Asplund \(2001\)](#).



Fonte: Autor

e valores subsolares para objetos com alta metalicidade. Por fim, [Berg \*et al.\* \(2020\)](#), que consideraram valores de abundância obtidas utilizando o método- $T_e$  para 190 regiões H II no disco de espirais, derivaram  $\text{Ar}/\text{O}$  subsolar para alguns poucos objetos com metalicidade baixa [ $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 8.0$ ]. Em princípio, uma possível explicação para as discrepâncias acima não é o uso de amostras distintas, mas sim o uso de diferentes ICFs de argônio. Em qualquer caso, pode-se ver na Figura 16, uma leve diminuição de  $\text{Ar}/\text{O}$  com o aumento de  $\text{O}/\text{H}$ , quando nossas estimativas são combinadas com as de galáxias H II. Ressalta-se que para [ $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \gtrsim 8.0$ ] nossas estimativas de  $\text{Ar}/\text{O}$  estão em acordo com aquelas para galáxias H II. Uma regressão linear considerando todos os pontos da Figura 16 (AGNs e SFs) produz

$$12 + \log(\text{Ar}/\text{O}) = (-0.11 \pm 0.02) x - (1.51 \pm 0.15), \quad (42)$$

sendo  $x=12+\log(\text{O}/\text{H})$ .

### 3 DETERMINAÇÃO DE ABUNDÂNCIA QUÍMICA DO ARGÔNIO POR LINHAS FORTES

Neste capítulo, desenvolvemos uma metodologia para encontrar uma calibração entre a razão de linhas  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  e a abundância do argônio em relação a do hidrogênio ( $\text{Ar}/\text{H}$ ). Esta calibração é útil nos casos em que não possuímos determinações diretas de temperatura eletrônica. No que segue, apresentamos a metodologia considerada para obter esta calibração, os resultados e a discussão sobre estes.

#### 3.1 Metodologia

A intensidade da razão de linhas  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  depende, principalmente, dos seguintes parâmetros nebulares:

- abundância de  $\text{Ar}/\text{H}$ ,
- temperatura eletrônica ( $T_e$ ) e
- grau de ionização do gás.

Logo, uma calibração entre  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  e  $\text{Ar}/\text{H}$  irá depender também de  $T_e$  e do grau de ionização. A dependência com  $T_e$  pode ser obtida estimando a metalicidade ou  $\text{O}/\text{H}$ , uma vez que o oxigênio é o principal elemento refrigerante do gás devido à diferença entre a energia dos níveis do oxigênio ser da ordem de  $KT_e$ . Sobre a dependência com o grau de ionização do gás, esta pode ser obtida se estimarmos o parâmetro de ionização do gás ( $U$ ) que, por sua vez, pode ser obtido utilizando a razão de linhas  $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727$ .

A razão de linhas  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  é pouco dependente da densidade eletrônica ( $N_e$ ) desde que assumirmos o regime de baixa densidade, ou melhor, que a densidade do gás onde o ion  $\text{Ar}^{2+}$  está localizado é inferior a densidade crítica da linha  $\lambda 7135$ , i.e.  $10^{6.7} \text{ cm}^{-3}$  (Vaona et al. 2012). A faixa de  $N_e$  derivada para NLRs de núcleos Seyfert 2 é de  $100 \lesssim N_e(\text{cm}^{-3}) \lesssim 4000$  (e.g. Dors et al. 2020), logo, esta linha não sofre efeitos de deexcitação colisional e  $N_e$  tem pouca influência sobre nossa calibração. Também, em relação a dependência de  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  com a correção por avermelhamento, esta razão de linhas possui comprimentos de ondas próximos e podemos desconsiderar esta dependência. Em resumo, em uma calibração entre  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  e  $\text{Ar}/\text{H}$  devemos levar em consideração principalmente a sua dependência com  $\text{O}/\text{H}$  e  $U$ .

Para obter a calibração em questão, utilizamos a mesma amostra de 63 núcleos Seyfert 2 considerada no capítulo anterior, como também, o valor de  $\text{O}/\text{H}$  de cada objeto obtido pelo método- $T_e$ . Para cada objeto, calculamos o parâmetro de ionização

( $U$ ) considerando uma calibração semi-empírica deste parâmetro e a razão de linhas  $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O III}]\lambda 3727$  proposta por Carvalho et al. (2020) para estudos de núcleos Seyfert 2. Logo, para cada objeto, possuímos os valores de  $[\text{Ar III}]/\text{H}\alpha$ ,  $\text{O}/\text{H}$  e  $U$ . Estes valores foram comparados com resultados de modelos de fotoionização a fim de se obter a abundância de  $\text{Ar}/\text{H}$ . Desta forma, iremos obter um conjunto de pontos com valores de  $\text{Ar}/\text{H}$  e  $[\text{Ar III}]/\text{H}\alpha$  o qual torna possível obter uma calibração. No que segue, apresentamos uma descrição da obtenção de  $U$ , dos modelos de fotoionização, a calibração obtida e uma discussão sobre esta.

### 3.1.1 Determinação do parâmetro de ionização

O parâmetro de ionização é definido por

$$U = \frac{Q_{ion}}{4\pi R_{in}^2 N c}, \quad (43)$$

sendo  $Q_{ion}$  o número de fótons ionizantes do hidrogênio (i.e. com energia superior a 13.6 eV) emitidos por segundo pela fonte ionizante,  $R_{in}$  a distância entre a fonte ionizante e a superfície central do gás (em cm),  $N$  a densidade de partícula (número de  $\text{H}^0 + \text{H}^+ + \text{H}_2$  por  $\text{cm}^3$ ), e  $c$  a velocidade da luz (em  $\text{cm s}^{-1}$ ). Quanto maior o valor de  $U$ , maior o grau de ionização do gás. Logo, linhas emitidas por um mesmo elemento com diferentes graus de ionização podem ser utilizadas para estimar  $U$ .

Carvalho *et al.* (2020) propuseram uma calibração semi-empírica entre a metalicidade  $Z$  e a razão de linhas  $N2 = \log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ , como também, entre  $\log U$  e  $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727$ . Para isso estes autores consideraram linhas de emissão de uma amostra de 463 Seyfert 2 obtidas por Dors et al. (2020) e resultados de modelos de fotoionização construídos com o código Cloudy. As calibrações acima foram obtidas comparando as intensidades de linhas preditas pelos modelos com as observacionais em uma diagrama  $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727$  versus  $N2$ . Carvalho *et al.* (2020) obtiveram a calibração

$$\log U = (0,57 \pm 0,01)x^2 + (1,38 \pm 0,01)x - (3,14 \pm 0,01), \quad (44)$$

sendo  $x = \log([\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727 + 29)$ . Esta calibração é independente da metalicidade como também de outros parâmetros nebulares e é válida para a faixa  $-4.0 \lesssim \log U \lesssim -2.2$ .

Para cada objeto da nossa amostra, consideramos o valor observacional de  $x$  e, aplicando a Eq. 44, derivamos o valor do logaritmo do parâmetro de ionização. Este valor, juntamente com as intensidades de linhas observacionais e com o valor de  $\text{O}/\text{H}$  obtido anteriormente utilizando o método- $T_e$ , produz para cada objeto o conjunto de pontos

$$F_{ob.} = ([\text{Ar III}]/\text{H}\alpha, \log U, \text{O}/\text{H}). \quad (45)$$

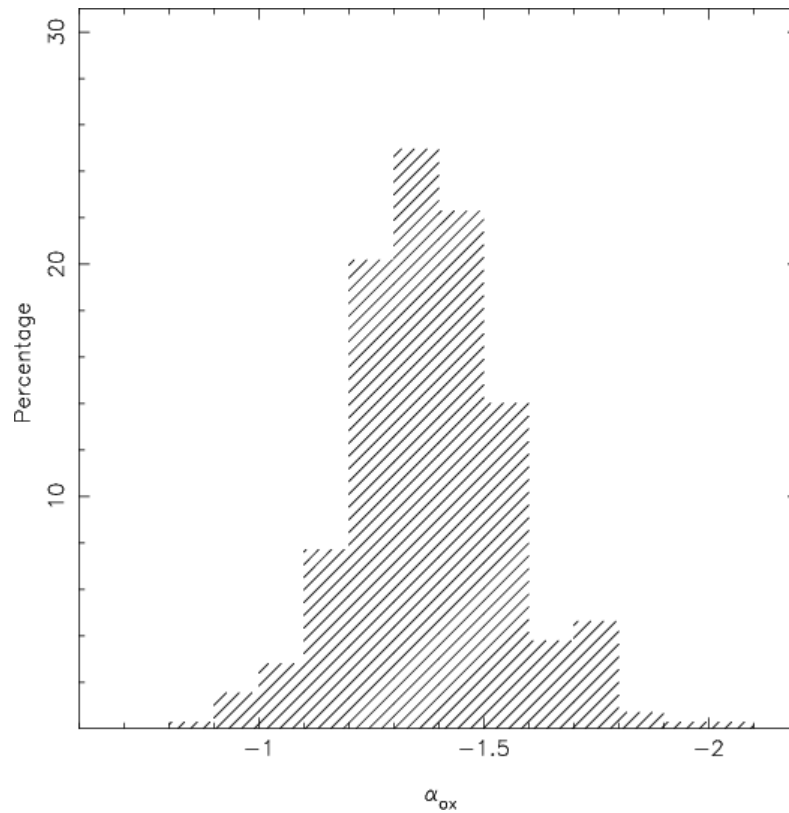
### 3.1.2 Modelos de fotoionização

Construímos uma grade de modelos de fotoionização utilizando o código CLOUDY versão 17.00<sup>1</sup>. Esses modelos assumem um ampla faixa de parâmetros de entrada cobrindo as propriedades físicas mais importantes para nosso estudos e são similares aos considerados por [Castro \*et al.\* \(2017\)](#) e [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#). Entretanto, estes autores consideraram uma relação linear entre a metalicidade  $Z$  e  $\text{Ar}/\text{H}$ , diferentemente do que foi assumido em nossos modelos. Segue abaixo uma descrição dos parâmetros utilizados.

- **Distribuição de Energia Espectral:** A Distribuição de Energia Espectral (SED) foi considerada composta pela soma de dois componentes: um representando o Big Blue Bump com pico em 1 Ryd, e outro, como uma lei de potência com índice espectral de  $\alpha_x = -1$ , representando a radiação não térmica de raios-X. O contínuo entre 3 keV e 2500 Å é descrito por uma lei de potência com índice espectral  $\alpha_{ox}$ . Na Figura 17, é mostrado um histograma contendo a distribuição do índice espectral  $\alpha_{ox}$  derivado observacionalmente por [Miller \*et al.\* \(2011\)](#) para aproximadamente 700 quasares *radio-intermediate* e *radio-loud*. Pode-se ver que a faixa de valores encontrados é de  $-0.8 \lesssim \alpha_{ox} \lesssim -2.2$ . [Castro \*et al.\* \(2017\)](#) utilizaram o valor de  $\alpha_{ox} = -1.4$  em seus modelos para derivar a calibração  $Z$ - $N2O2$ , enquanto que [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#) contruíram modelos com três valores de  $\alpha_{ox}$ :  $-0.8$ ,  $-1.1$  e  $-1.4$ . No entanto, [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#) ao derivarem a calibração  $Z$ - $N2$  não consideraram  $\alpha_{ox} = -1.4$  porque, quando este valor foi assumido, as razões  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  dos modelos eram, em geral, inferiores as observacionais. Logo, em nossos modelos utilizamos somente  $\alpha_{ox} = -0.8$  e  $-1.1$ .
- **Parâmetro de Ionização:** Variamos o logaritmo do parâmetro de ionização ( $U$ ) de  $-3.0$  a  $-1.0$ . com passo de 0,5 dex. Modelos considerando essa faixa de valores predizem intensidades de linhas de emissão similares às observadas no óptico (e.g. [Carvalho \*et al.\* 2020](#)), ultravioleta (e.g. [Dors et al. 2014, 2019](#)) e no infravermelho ([Dors \*et al.\* 2012](#)) para objetos em uma larga faixa de *redshift* ( $0 \leq z \lesssim 7$ ). A geometria dos modelos é plano paralela.
- **Densidade Eletrônica:** A densidade eletrônica  $N_e$  foi considerada constante ao longo do raio do AGN e os valores de 100 e 500 partículas  $\text{cm}^{-3}$  foram assumidos. Esses valores são representativos para a nossa amostra, como mostrado na Tabela 1. A densidade média calculada utilizando o código PYNEB ([LURIDIANA; MORISSET; SHAW, 2015](#)) e a intensidade observacional da razão de linhas  $[\text{S II}]\lambda 6716/\lambda 6731$  é de 472 com desvio padrão de 336, sendo que 75% da amostra tem densidade menor do que  $600 \text{ cm}^{-3}$ .

<sup>1</sup> Este código é disponível em [www.nublado.org](http://www.nublado.org).

Figura 17 – Histograma contendo a distribuição do índice espectral  $\alpha_{ox}$  derivado por Miller *et al.* (2011) para aproximadamente 700 quasares *radio-intermediate* e *radio-loud*



Fonte: Dors *et al.* (2019)

- Metalicidade e abundância química: A metalicidade ( $Z$ ) do gás foi linearmente escalada com a metalicidade solar ( $Z_{\odot}$ ) e os seguintes valores foram considerados:  $(Z/Z_{\odot}) = 0,2, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5$  e  $4,0$ . Assumindo  $12 + \log(O/H)_{\odot} = 8,69$  (AllendePrieto et al 2001), a faixa de metalicidade acima corresponde a  $12 + \log(O/H) = 8,00, 8,40, 8,56, 8,69, 8,86, 9,00, 9,09, 9,17, 9,23, 9,29$ , respectivamente. A abundância de Ar/H foi variada independentemente de  $Z$  e considerando  $0,1, 0,2, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5$  e  $4,0$  vezes o valor solar deste elemento, i.e.  $12 + \log(Ar/H)_{\odot} = 6,40$  obtida de Grevesse *et al.* (2010). Estes valores correspondem a  $12 + \log(Ar/H)$  igual a  $5,40, 5,70, 6,10, 6,28, 6,40, 6,58, 6,70, 6,80, 6,88, 6,94$  e  $7,00$ . A abundância do nitrogênio foi calculada usando a relação

$$12 + \log(N/H) = 1,29 * [12 + \log(O/H)] - 11,84, \quad (46)$$

válida para  $12 + \log(O/H) \gtrsim 8,0$  ou  $(Z/Z_{\odot}) \gtrsim 0,2$ . Essa relação foi utilizada nos modelos de Carvalho *et al.* (2020) e foi obtida ajustando estimativas de N e O para Seyfert 2 e regiões de formação estelar por Dors *et al.* (2017). Todos os modelos considerados no presente trabalho são livres de poeiras.

### 3.2 Resultados e discussão

Nas Figs. 18 e 19 são mostrados os diagramas considerados para determinar a calibração entre  $[\text{Ar III}]/\text{H}\alpha$  e  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$ . Estes diagramas contém razões de linhas de  $[\text{Ar III}]/\text{H}\alpha$  preditas pelos modelos de fotoionização (eixo y) e valores de  $12+\log(\text{O}/\text{H})$  (eixo x) utilizados como parâmetros de entrada nos modelos. As curvas representam resultados dos modelos de fotoionização considerando diferentes valores de  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$  (representados por diferentes cores) e, em cada painel, são apresentados resultados de modelos considerando diferentes valores de  $\alpha_{ox}$ ,  $N_e$  e  $\log U$ . Podemos notar que os resultados dos modelos (curvas) são somente distintos para o regime de bem alta metalicidade, i.e.  $(12 + \log(\text{O}/\text{H})) \gtrsim 9.0$ , com alguma dependência somente com o parâmetro de ionização.

Em cada painel da Fig. 19 estão os pontos representando a nossa amostra de objetos, i.e. pontos pertencentes ao conjunto  $F_{ob.}$  (ver Eq. 45). Em cada painel, apresentamos os objetos de acordo com a faixa de valores de  $\log U$  calculado individualmente para cada objeto utilizando a calibração representada pela Eq. 44 obtida por [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#). Para isto, adotamos os seguintes critérios:

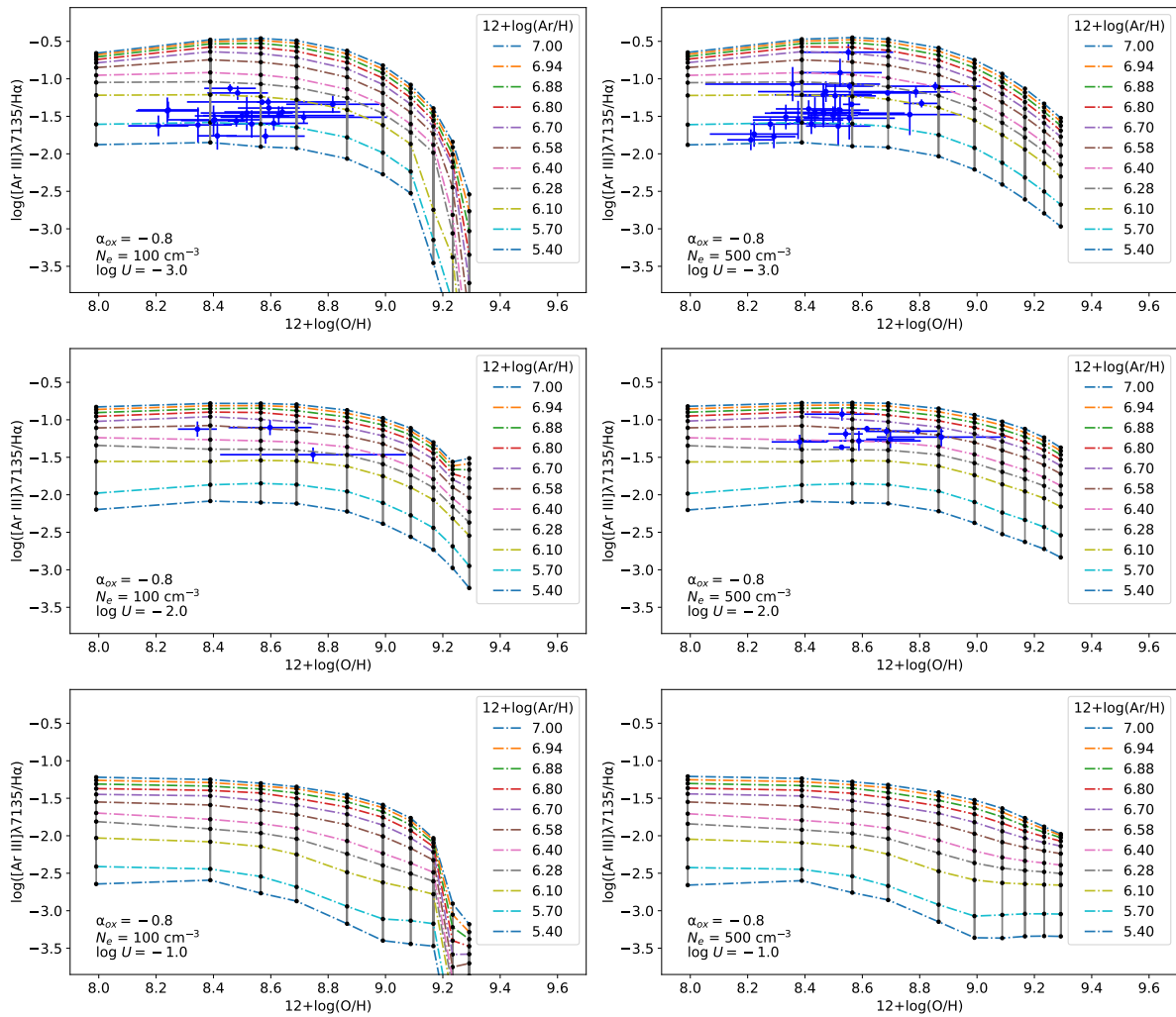
- Se objetos possuem  $\log U \leq -2,5$  estes são considerados somente nos painéis com modelos assumindo  $\log U = -3,0$ .
- Se objetos possuem  $-2,5 < \log U \leq -1,5$  estes são considerados somente nos painéis com modelos assumindo  $\log U = -2,0$ .
- Se objetos possuem  $\log U > -1,5$  estes são considerados somente nos painéis com modelos assumindo  $\log U = -1,0$ .

Com relação a densidade, ela foi calculada para a nossa amostra usando a função `getCrosTemDen`, do código PYNEB e apresentada na Tabela 1. De acordo com o intervalo de densidade dos objetos da nossa amostra, estes foram distribuídos nos painéis das Figs. 18 e 19. Para isso, assumimos os seguintes critérios:

- Se objetos possuírem  $N_e \leq 300 \text{ cm}^{-3}$ , estes são considerados somente nos painéis com modelos assumindo  $N_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ .
- Se objetos possuírem  $N_e > 300 \text{ cm}^{-3}$  estes são considerados somente nos painéis com modelos assumindo  $N_e = 500 \text{ cm}^{-3}$ .

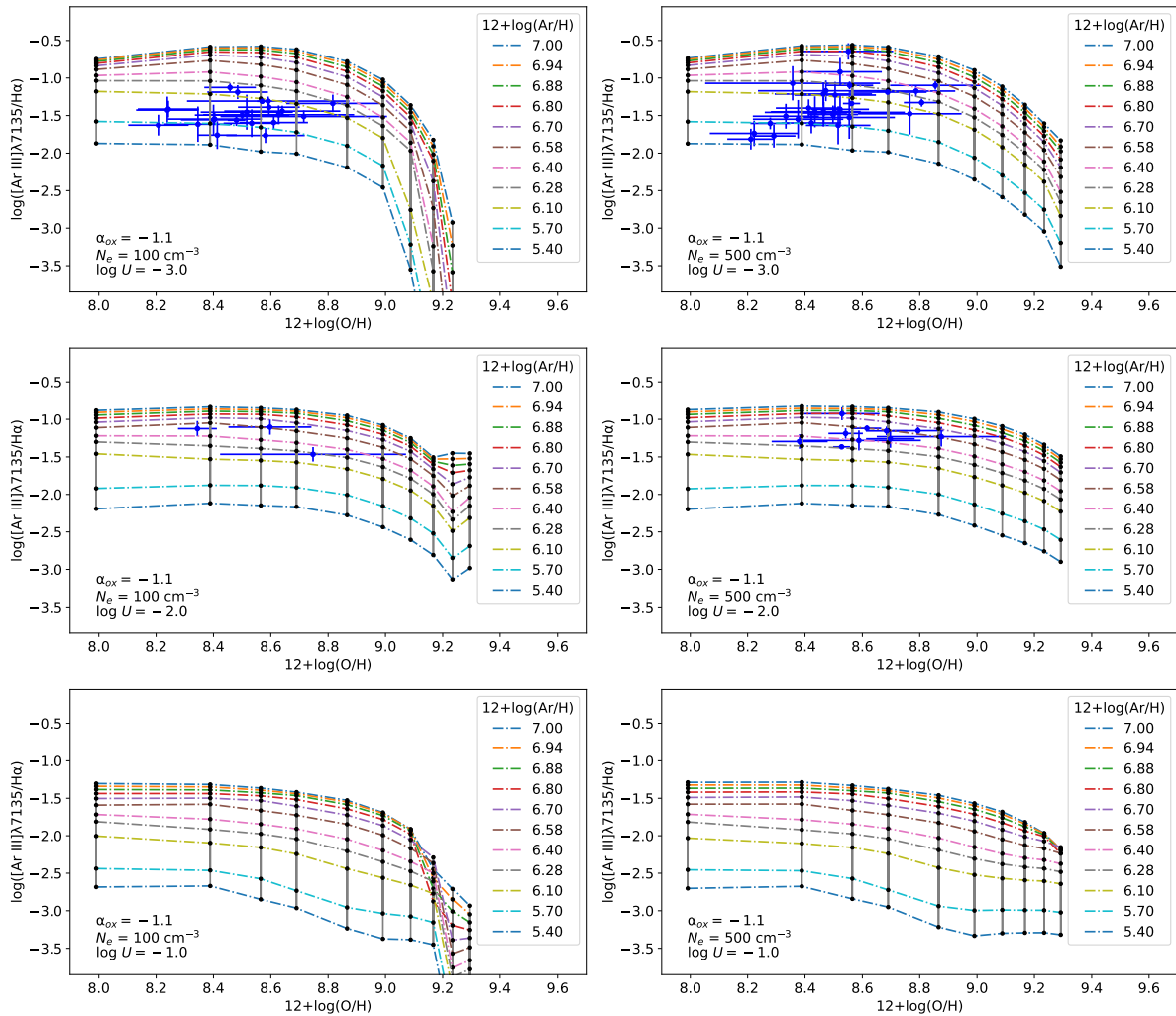
Como não encontramos nenhum objeto com  $\log U > -1,5$ , não há pontos nos painéis inferiores das figuras Figs. 18 e 19. Isto é esperado uma vez que [Carvalho \*et al.\* \(2020\)](#) não derivaram para sua amostra (que contém os objetos da nossa amostra) valores de  $\log U > -1,5$ .

Figura 18 –  $\log([\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha)$  versus  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ . Curvas representam resultados de modelos de fotoionização considerando diferentes abundâncias de  $\text{Ar}/\text{H}$  e assumindo valores fixos do expoente da SED ( $\alpha_{\text{ox}}$ ), de densidade eletrônica ( $N_e$ ) e logaritmo do parâmetro de ionização ( $\log U$ ). Pontos azuis com barras de erros representam os valores para a nossa amostra [pertencentes ao conjunto  $F_{\text{ob}}$ . (ver Eq. 45)] classificados de acordo com a densidade calculada pelo PYNEB e o  $\log U$  pela Equação 44. Todos os modelos consideram  $\alpha_{\text{ox}} = -0.8$ .



Fonte: Autor

Figura 19 – Mesmo que a Fig. 18 mas para modelos assumindo  $\alpha_{ox} = -1,1$ .



Fonte: Autor

Para cada ponto representando uma Seyfert 2 nas Figs. 18 e 19, por meio de interpolações dos modelos, obtivemos um par de pontos  $[(Ar/H), \log([A III]\lambda 7135/H\alpha)]$  que são apresentados na Fig. 20. Em cada painel desta figura, está o resultado das interpolações de acordo com os parâmetros  $\alpha_{ox}$ ,  $N_e$  e  $\log U$ . Consideramos um ajuste linear sobre os pontos em cada painel da Fig. 20 dado por

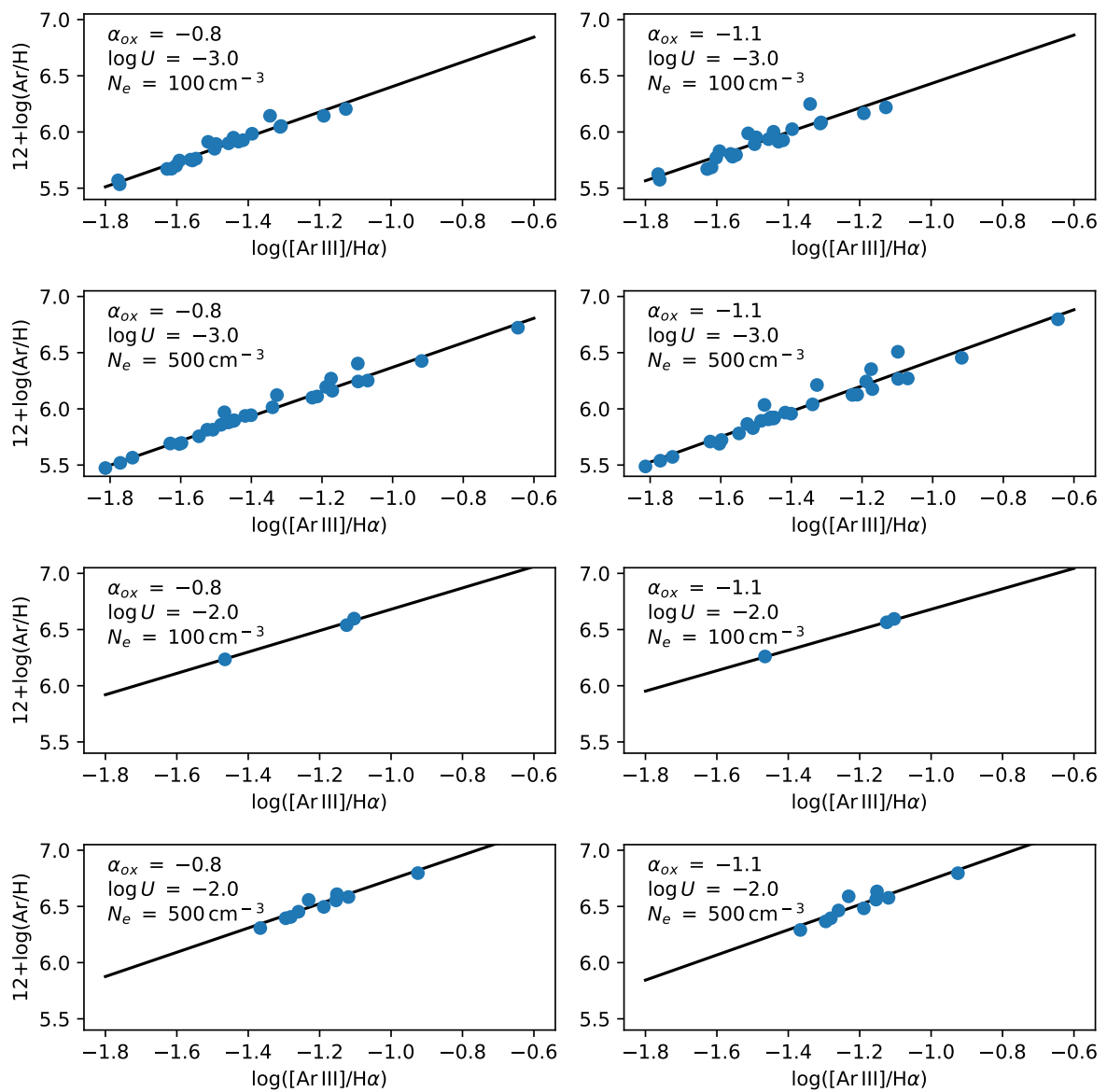
$$12 + \log(Ar/H) = a \times \log([Ar III]\lambda 7135/H\alpha) + b, \quad (47)$$

sendo que coeficientes  $a$  e  $b$  estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes dos ajustes lineares apresentados na Figura 20.

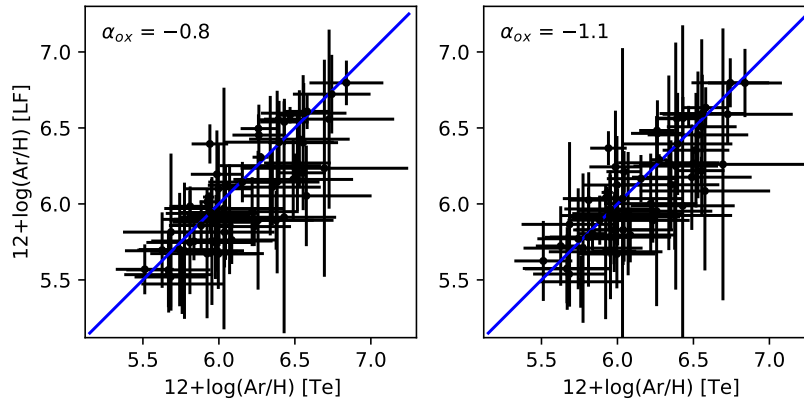
		$\alpha_{ox} = -0,8$		$\alpha_{ox} = -1,1$	
$\log U$	$N_e$	a	b	a	b
-3,0	100	$1,11 \pm 0,06$	$7,51 \pm 0,09$	$1,08 \pm 0,08$	$7,51 \pm 0,09$
-3,0	500	$1,09 \pm 0,03$	$7,46 \pm 0,05$	$1,13 \pm 0,05$	$7,56 \pm 0,07$
-2,0	100	$0,95 \pm 0,09$	$7,63 \pm 0,12$	$0,91 \pm 0,03$	$7,59 \pm 0,04$
-2,0	500	$1,08 \pm 0,10$	$7,82 \pm 0,12$	$1,12 \pm 0,14$	$7,86 \pm 0,18$

Figura 20 –  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$  versus  $\log([\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha)$ . Os pontos representam os valores derivados para cada objetos mediante interpolações dos modelos apresentados nas Figs. 18 e 19. As linhas em cada painel representam ajustes lineares sobre os valores cujo os coeficientes são listados na Tabela 4.



Fonte: Autor

Figura 21 – Comparação dos resultados obtidos pelo método- $T_e$  [Te], apresentado no Cap. 3, e método de linhas fortes [LF] (ver Eq. 47). No painel esquerdo são apresentados comparativos com resultados de modelos assumindo  $\alpha_{ox} = -0,8$  e no painel direito com modelos assumindo  $\alpha_{ox} = -1,1$ . A linha azul representa a igualdade entre as estimativas.



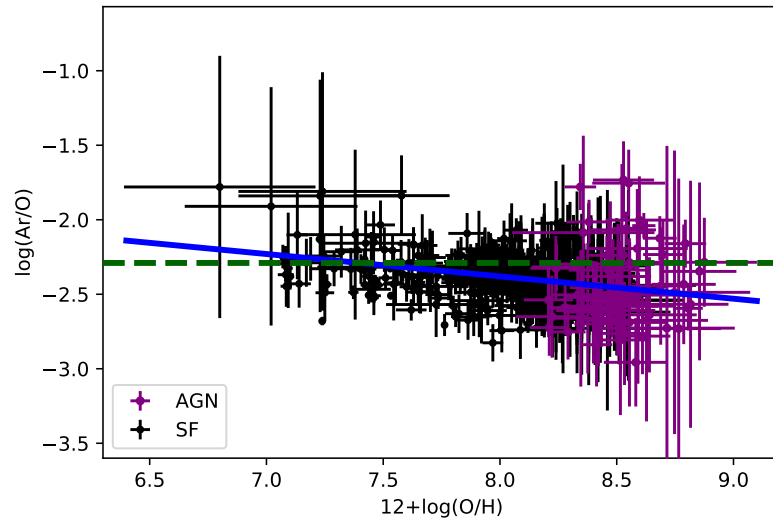
Fonte: Autor

Na Figura 21, apresentamos uma comparação entre os valores de  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$  para a nossa amostra de objetos, calculados utilizando a Eq. 47 e considerando os coeficientes listados na Tabela 4 para  $\alpha_{ox} = -0,8, -1,1$ , com os valores de  $12+\log(\text{Ar}/\text{H})$  calculados com o método- $T_e$ . No painel esquerdo são apresentados comparativos com resultados calculados  $\alpha_{ox} = -0,8$  e no painel direito comparativo com  $\alpha_{ox} = -1,1$ . A linha azul representa a igualdade entre as estimativas. O coeficiente de correlação de Pearson é aproximadamente 0.82. Com base neste acordo entre as estimativas e, devido aos coeficientes do ajuste variarem muito pouco em relação as variações de  $\alpha_{ox}$ ,  $N_e$  e  $\log U$  (ver Tabela 4), produzimos um ajuste considerando todos os pontos, i.e. sem discriminar os parâmetros nebulares acima e encontramos

$$12 + \log(\text{Ar}/\text{H}) = 1.05(\pm 0.08) \times \log([\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha) + 7.61(\pm 0.14). \quad (48)$$

Na Fig. 22, o logaritmo da abundância de Ar/O versus a abundância de oxigênio é apresentado. Pontos roxos representam estimativas para nossa amostra, com a abundância do argônio calculado com método de linhas fortes, i.e. utilizando os dados observacionais da nossa amostra e a Eq. 48. Pontos pretos representam estimativas de abundâncias de galáxias H II derivadas por Izotov *et al.* (2006) e Hägele *et al.* (2008). A linha azul representa o ajuste linear sobre os pontos. A linha tracejada verde representa o valor solar de  $\log(\text{Ar}/\text{O}) = -2,29$  derivado por Grevesse e Sauval (1998) e Prieto, Lambert e

Figura 22 – Logaritmo da abundância de Ar/O versus a abundância de oxigênio. Pontos roxos representam estimativas para nossa amostra, com a abundância do argônio calculado com método de linhas fortes, i.e. utilizando a Eq. 48. Pontos pretos representam estimativas para galáxias H II derivadas por *Izotov et al.* (2006) e *Hägele et al.* (2008). A linha azul representa o ajuste linear sobre os pontos. A linha tracejada verde representa o valor solar de  $\log(\text{Ar}/\text{O}) = -2,29$  derivado por *Grevesse e Sauval* (1998) e *Prieto, Lambert e Asplund* (2001).



Fonte: Autor

*Asplund* (2001). Podemos notar com base na Figura 22 que obtivemos o mesmo resultado do capítulo anterior, i.e. a abundância do Ar/H é praticamente constante em uma larga faixa de O/H (ou de metalidade).

Desta forma, com base nas figuras 21 e 22 mostramos que a nossa calibração que utiliza apenas a razão de linhas fortes  $[\text{Ar III}]/\text{H}\alpha$  fornece valores confiáveis da abundância de argônio em relação a do hidrogênio (Ar/H) para Seyfert 2.

## 4 CONCLUSÃO

Pela primeira vez, determinações de abundâncias quantitativas de argônio (Ar/H), derivadas utilizando o método- $T_e$  adaptado para AGNs, são derivadas para as regiões de linhas estreitas de núcleos Seyfert 2. Também, uma calibração entre a razão de linhas fortes  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  e Ar/H foi obtida. Em vista disso, compilamos fluxos de linhas de emissão estreitas de 64 galáxias Seyfert 2 no universo local ( $z < 0,25$ ), observadas na faixa do ótico ( $3000 < \lambda(\text{\AA}) < 8000$ ), obtidas do Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (SDSS-DR7) e medidas pelo grupo MPA/JHU. Utilizando estes dados observacionais e resultados de uma grade de modelos fotoionização construídos com o código Cloudy, calculamos a abundância de argônio e oxigênio em relação a hidrogênio (Ar/H, O/H). A abundância de argônio total em relação ao hidrogênio (Ar/H) foi derivada para cada objeto da amostra utilizando a abundância iônica  $\text{Ar}^{2+}/\text{H}\alpha$  e usando uma expressão teórica para o Fator de Correção de Ionização (ICF) obtidos a partir dos resultados de modelos de fotoionização construídos com o código CLOUDY. Esses resultados dos modelos também foram usados para derivar uma temperatura apropriada para o  $\text{Ar}^{2+}$  [ $T_e(\text{Ar III})$ ], que pode ser derivada por sua dependência com a temperatura para  $\text{O}^{2+}$  [ $T_e(\text{O III})$ ]. Obtivemos as seguintes conclusões:

1. A igualdade entre as temperaturas  $T_e(\text{S III})=T_e(\text{Ar III})$ , geralmente assumida em estudos de abundância de regiões de formação estelar, não é válida para Seyfert 2, uma vez que a região de gás nebuloso ocupada por  $\text{Ar}^{2+}$  tende a ter uma temperatura mais baixa do que a região ocupada por  $\text{S}^{2+}$ .
2. Uma expressão biparamétrica para o  $\text{ICF}(\text{Ar}^{2+})$  como função da razão  $x = [\text{O}^{2+}/(\text{O}^+ + \text{O}^{2+})]$  e da abundância de oxigênio [em unidades de  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ ] é proposta para derivar a abundância total de argônio.
3. Para a faixa de abundância de oxigênio  $8.0 \lesssim [12 + \log(\text{O}/\text{H})] \lesssim 9.0$  ou metalicidade  $0,20 \lesssim (Z/Z_\odot) \lesssim 2,0$ , encontramos que nossa amostra de Seyfert 2 apresentam abundâncias de A/H variando de  $\sim 0.1$  a  $\sim 3$  vezes o valor solar do argônio, indicando que a maioria dos objetos ( $\sim 75\%$ ) tem abundância subsolar de argônio.
4. Os intervalos de valores de abundância de Ar/H e Ar/O obtidos para nossa amostra estão em consonância com os estimados a partir de extrapolações de gradientes de

abundância radial para partes centrais do disco de quatro galáxias espirais.

5. Encontramos uma ligeira tendência de diminuição da razão de abundância Ar/O com O/H para o regime de alta metalicidade.
6. Os valores de abundância de Ar/O para nossa amostra de Seyfert 2 estão em consonância com as estimativas para galáxias H II no regime  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \gtrsim 8.0$ , indicando que não há um enriquecimento excessivo de argônio em AGNs, pelo menos para a faixa de metalicidade considerada.
7. Finalmente, propomos uma calibração entre a razão de linhas fortes  $[\text{Ar III}]\lambda 7135/\text{H}\alpha$  e Ar/H que fornece valores da abundância do argônio similar aos derivados pelo método- $T_e$ .

## REFERÊNCIAS

- ABAZAJIAN, K. *et al.* The third data release of the Sloan Digital Sky Survey. *The Astronomical Journal*, v. 129, n. 3, p. 1755–1759, mar. 2005.
- AKIYAMA, K. *et al.* First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *The Astrophysical Journal*, v. 875, n. 1, p. L1, apr 2019. ISSN 2041-8213.
- ALLOIN, D. *et al.* ESO 138 G1: a high excitation Seyfert 2 nucleus in a low luminosity early-type galaxy. *Astronomy and Astrophysics*, v. 266, p. 117–126, dez. 1992.
- ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, M. *et al.* A comprehensive photometric study of circumnuclear star-forming rings - I. The sample. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 451, n. 3, p. 3173–3191, ago. 2015.
- AMAYO, A.; DELGADO-INGLADA, G.; STASIŃSKA, G. Ionization correction factors and dust depletion patterns in giant H II regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 505, n. 2, p. 2361–2376, ago. 2021.
- ANTONUCCI, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 31, n. 1, p. 473–521, sep 1993. ISSN 0066-4146.
- ARMAH, M. *et al.* Chemical abundances in Seyfert galaxies - VII. Direct abundance determination of neon based on optical and infrared emission lines. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 508, n. 1, p. 371–391, nov. 2021.
- ARTYMOWICZ, P.; LIN, D. N. C.; WAMPLER, E. J. Star trapping and metallicity enrichment in quasars and active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, v. 409, p. 592, jun. 1993.
- ATHANASSOULA, E. The existence and shapes of dust lanes in galactic bars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 259, p. 345–364, nov. 1992.
- 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, fev. 1981.
- BASTIAN, N.; COVEY, K. R.; MEYER, M. R. A universal stellar initial mass function? A critical look at variations. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 48, p. 339–389, set. 2010.
- BERG, D. A. *et al.* CHAOS IV: Gas-phase Abundance Trends from the First Four CHAOS Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 893, n. 2, p. 96, abr. 2020.
- BERG, D. A. *et al.* CHAOS I. Direct Chemical Abundances for H II Regions in NGC 628. *The Astrophysical Journal*, v. 806, n. 1, p. 16, jun. 2015.
- BOER, B.; SCHULZ, H. NGC 6951: circumnuclear star formation around a Seyfert nucleus. *Astronomy and Astrophysics*, v. 277, p. 397–404, out. 1993.

- BÖKER, T. *et al.* A SINFONI view of galaxy centers: morphology and kinematics of five nuclear star formation-rings. *The Astronomical Journal*, v. 135, n. 2, p. 479–495, fev. 2008.
- BRESOLIN, F. *et al.* Extragalactic chemical abundances: do H II regions and young stars tell the same story? The case of the spiral galaxy NGC 300. *The Astrophysical Journal*, v. 700, n. 1, p. 309–330, jul. 2009.
- CANTIELLO, M.; JERMYN, A. S.; LIN, D. N. C. Stellar evolution in AGN disks. *The Astrophysical Journal*, v. 910, n. 2, p. 94, abr. 2021.
- 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. 000, n. January, fev 2020. ISSN 0035-8711.
- CASTRO, C. S. *et al.* New metallicity calibration for Seyfert 2 galaxies based on the N 2 O 2 index. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 467, n. 2, p. stx150, jan 2017. ISSN 0035-8711.
- CHISHOLM, J. *et al.* The mass and momentum outflow rates of photoionized galactic outflows. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 469, n. 4, p. 4831–4849, ago. 2017.
- CIPRIANO, L. T. S. *et al.* Carbon and oxygen in H II regions of the Magellanic Clouds: abundance discrepancy and chemical evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 467, n. 3, p. 3759–3774, maio 2017.
- COLLIN, S.; ZAHN, J. P. Star formation in accretion disks around massive black holes and pregalactic enrichment. *Applied Surface Science*, v. 265, p. 501–505, jul. 1999.
- COLLIN, S.; ZAHN, J. P. Star formation in accretion discs: from the Galactic center to active galactic nuclei. *Astronomy and Astrophysics*, v. 477, n. 2, p. 419–435, jan. 2008.
- COPETTI, M. V. *et al.* Internal variation of electron density in galactic HII regions. *Astronomy and Astrophysics*, v. 357, n. 2, p. 621–636, 2000.
- COUTO, G. S. *et al.* VALES VIII: Weak ionized gas outflows in star-forming galaxies at  $z \sim 0.15$  traced with VLT/MUSE. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2108.02334, ago. 2021.
- CROXALL, K. V. *et al.* CHAOS II. Gas-phase abundances in NGC 5194. *The Astrophysical Journal*, v. 808, n. 1, p. 42, jul. 2015.
- CROXALL, K. V. *et al.* CHAOS III: Gas-phase Abundances in NGC 5457. *The Astrophysical Journal*, v. 830, n. 1, p. 4, out. 2016.
- D’AGOSTINO, J. J. *et al.* Separating line emission from star formation, shocks, and AGN ionization in NGC 1068. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 487, n. 3, p. 4153–4168, aug 2019. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article/487/3/4153/5513463>>.
- DAVIES, M. B.; LIN, D. N. C. Making massive stars in the Galactic Centre via accretion on to low-mass stars within an accretion disc. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 498, n. 3, p. 3452–3456, nov. 2020.

- DELGADO-INGLADA, G.; MORISSET, C.; STASIŃSKA, G. Ionization correction factors for planetary nebulae - I. Using optical spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 440, n. 1, p. 536–554, maio 2014.
- DÍAZ, A. I. *et al.* The metal abundance of circumnuclear star-forming regions in early-type spirals. Spectrophotometric observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 382, n. 1, p. 251–269, nov. 2007.
- DOPITA, M. A. *et al.* Probing the physics of narrow line regions in active galaxies. II. The Siding Spring Southern Seyfert Spectroscopic Snapshot Survey (S7). *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 217, n. 1, p. 12, mar. 2015.
- DORS, O. Chemical abundances in Seyfert galaxies VI. Empirical abundance calibration. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, p. arXiv:2107.11606, jul. 2021.
- DORS, O. L. *et al.* New quantitative nitrogen abundance estimations in a sample of Seyfert 2 active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, v. 468, n. 1, p. L113–L117, jun 2017. ISSN 1745-3925.
- DORS, O. L. *et al.* Metallicity evolution of AGNs from UV emission lines based on a new index. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 443, n. 2, p. 1291–1300, sep 2014. ISSN 1365-2966.
- DORS, O. L. *et al.* On the central abundances of active galactic nuclei and star-forming galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 453, n. 4, p. 4103–4112, nov 2015. ISSN 0035-8711.
- DORS, O. L. *et al.* Chemical abundances of Seyfert 2 AGNs - IV. Composite models calculated by photoionization + shocks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 501, n. 1, p. 1370–1383, fev. 2021.
- DORS, O. L. *et al.* Chemical abundances of Seyfert 2 AGNs - I. Comparing oxygen abundances from distinct methods using SDSS. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 492, n. 1, p. 468–479, fev. 2020.
- DORS, O. L. *et al.* Optical and mid-infrared neon abundance determinations in star-forming regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 432, n. 3, p. 2512–2528, 2013. ISSN 00358711.
- DORS, O. L. *et al.* Chemical abundances of Seyfert 2 AGNs - III. Reducing the oxygen abundance discrepancy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 496, n. 3, p. 3209–3221, ago. 2020.
- DORS, O. L. *et al.* Semi-empirical metallicity calibrations based on ultraviolet emission lines of type-2 AGNs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 486, n. 4, p. 5853–5866, 2019. ISSN 13652966.
- DORS, O. L. *et al.* Sulphur abundance determinations in star-forming regions - I. Ionization correction factor. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 456, n. 4, p. 4407–4424, mar. 2016.
- DORS, O. L. *et al.* X-rays as the dominant excitation mechanism of [Fe ii] and H2 emission lines in active galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 422, n. 1, p. 252–260, may 2012. ISSN 00358711.

- DORS O. L., J. *et al.* Ages and metallicities of circumnuclear star formation regions from Gemini IFU observations. *Astronomy and Astrophysics*, v. 482, n. 1, p. 59–65, abr. 2008.
- DRESSLER, A. Studying the internal kinematics of galaxies using the calcium infrared triplet. *The Astrophysical Journal*, Cambridge University Press, Cambridge, v. 286, n. 9, p. 97, nov 1984. ISSN 0004-637X.
- ELMEGREEN, D. M. *et al.* Circumnuclear star formation in the spiral galaxy NGC 3310. *The Astronomical Journal*, v. 123, n. 3, p. 1381–1388, mar. 2002.
- FATH, E. A. The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters. *Lick Observatory Bulletins*, v. 5, p. 71–77, 1909. ISSN 0075-9317.
- FELTRE, A.; CHARLOT, S.; GUTKIN, J. Nuclear activity versus star formation: emission-line diagnostics at ultraviolet and optical wavelengths. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 456, n. 3, p. 3354–3374, mar 2016. ISSN 0035-8711.
- FERLAND, G. J. *et al.* The 2017 release of Cloudy. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, v. 53, p. 385–438, may 2017.
- FERLAND, G. J.; OSTERBROCK, D. E. IUE Spectra and a resulting model of Seyfert 2 galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 300, p. 658, jan. 1986.
- FERLAND, G. J. *et al.* The 2013 release of Cloudy. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, v. 49, p. 137–163, feb 2013.
- FERLAND, G. J.; TRURAN, J. W. On the carbon composition of the ejecta of DQ Her. *The Astrophysical Journal*, v. 240, p. 608–611, set. 1980.
- FLURY, S. R.; MORAN, E. C. Chemical abundances in active galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 496, n. 2, p. 2191–2203, jun. 2020.
- FRENCH, H. B. The ionization structure and abundance of argon in gaseous nebulae. *The Astrophysical Journal*, v. 246, p. 434–443, jun. 1981.
- GARNETT, D. R. Electron temperature variations and the measurement of nebular abundances. *The Astronomical Journal*, v. 103, n. 4, p. 1330, apr 1992. ISSN 00046256.
- GOODMAN, J.; TAN, J. C. Supermassive stars in quasar disks. *The Astrophysical Journal*, v. 608, n. 1, p. 108–118, jun. 2004.
- GREVESSE, N. *et al.* The chemical composition of the Sun. *Applied Surface Science*, v. 328, n. 1-2, p. 179–183, jul. 2010.
- GREVESSE, N.; SAUVAL, A. J. Standard solar composition. *Space Science Reviews*, v. 85, p. 161–174, maio 1998.
- GROVES, B. A.; HECKMAN, T. M.; KAUFFMANN, G. Emission-line diagnostics of low-metallicity active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 371, n. 4, p. 1559–1569, Oct 2006.
- GUSEVA, N. G. *et al.* VLT spectroscopy of low-metallicity emission-line galaxies: abundance patterns and abundance discrepancies. *Astronomy and Astrophysics*, v. 529, p. A149, maio 2011.

- HÄGELE, G. F. *et al.* Precision abundance analysis of bright H II galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 383, n. 1, p. 209–229, 2008.
- HÄGELE, G. F. *et al.* Implications of the kinematical structure of circumnuclear star-forming regions on their derived properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 432, n. 1, p. 810–821, jun. 2013.
- HARMS, R. J. *et al.* HST FOS spectroscopy of M87: Evidence for a disk of ionized gas around a massive black hole. *The Astrophysical Journal*, v. 435, p. L35, nov 1994. ISSN 0004-637X.
- HECKMAN, T. M.; BEST, P. N. The coevolution of galaxies and supermassive black holes: insights from surveys of the contemporary universe. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 52, n. 1, p. 589–660, 2014. ISSN 0066-4146.
- HIRSCHMANN, M. *et al.* The effect of metal enrichment and galactic winds on galaxy formation in cosmological zoom simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 436, n. 4, p. 2929–2949, dez. 2013.
- HOPKINS, P. F. *et al.* Stellar feedback and bulge formation in clumpy discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 427, n. 2, p. 968–978, dez. 2012.
- IZOTOV, Y. I. *et al.* The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the data release 3 of the sloan digital sky survey. *Astronomy and Astrophysics*, v. 448, n. 3, p. 955–970, 2006. ISSN 00046361.
- IZOTOV, Y. I.; THUAN, T. X. Heavy-element abundances in blue compact galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 511, n. 2, p. 639–659, fev. 1999.
- IZOTOV, Y. I.; THUAN, T. X. Active galactic nuclei in four metal-poor dwarf emission-line galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 687, n. 1, p. 133–140, nov. 2008.
- JAMES, B. L. *et al.* Exploring chemical homogeneity in dwarf galaxies: a VLT-MUSE study of JKB 18. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 495, n. 3, p. 2564–2581, jul. 2020.
- KAUFFMANN, G. *et al.* Stellar masses and star formation histories for 10 5 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 341, n. 1, p. 33–53, may 2003.
- KENNICUTT, R. C.; BRESOLIN, F.; GARNETT, D. R. The composition gradient in M101 revisited. II. Electron temperatures and implications for the nebular abundance scale. *The Astrophysical Journal*, v. 591, n. 2, p. 801–820, 2003. ISSN 0004-637X.
- KEWLEY, L. J. *et al.* Theoretical modeling of starburst galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 556, n. 1, p. 121–140, 2001. ISSN 0004-637X.
- KEWLEY, L. J. *et al.* The host galaxies and classification of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 372, n. 3, p. 961–976, nov 2006. ISSN 0035-8711.
- KEWLEY, L. J.; JANSEN, R. A.; GELLER, M. J. Aperture Effects on Star Formation Rate, Metallicity, and Reddening. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 117, n. 829, p. 227–244, mar 2005.

- KEWLEY, L. J.; NICHOLLS, D. C.; SUTHERLAND, R. S. Understanding galaxy evolution through emission lines. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 57, n. 1, p. 511–570, aug 2019. ISSN 0066-4146.
- KINKEL, U.; ROSA, M. R. How metal-rich are metal-rich HII regions. *Astronomy and Astrophysics*, v. 282, p. L37–L40, fev. 1994.
- KORMENDY, J. Evidence for a central dark mass in NGC 4594 (the Sombrero galaxy). *The Astrophysical Journal*, v. 335, n. 2, p. 40, dec 1988. ISSN 0004-637X.
- KOSKI, A. T. Spectrophotometry of Seyfert 2 galaxies and narrow-line radio galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 223, p. 56–73, jul. 1978.
- KRABBE, A. C. *et al.* Chemical abundance of the LINER galaxy UGC 4805 with SDSS-IV MaNGA. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 505, n. 2, p. 2087–2102, ago. 2021.
- KRUMHOLZ, M. R.; KRUIJSSEN, J. M. D.; CROCKER, R. M. A dynamical model for gas flows, star formation and nuclear winds in galactic centres. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 466, n. 1, p. 1213–1233, abr. 2017.
- LEE, H.; SKILLMAN, E. D. Chemical abundances of H II regions in the starburst galaxy NGC 1705. *The Astrophysical Journal*, v. 614, n. 2, p. 698–715, out. 2004.
- LURIDIANA, V.; MORISSET, C.; SHAW, R. A. PyNeb: a new software for the analysis of emission lines. In: *IAU Symposium*. [S.l.: s.n.], 2012. (IAU Symposium, v. 283), p. 422–423.
- LURIDIANA, V.; MORISSET, C.; SHAW, R. A. PyNeb: A new tool for analyzing emission lines: I. Code description and validation of results. *Astronomy and Astrophysics*, v. 573, 2015. ISSN 14320746.
- LYNDEN-BELL, D.; REES, M. J. On quasars, dust and the galactic centre. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 152, n. 4, p. 461–475, jul 1971. ISSN 0035-8711.
- MA, J. *et al.* Spatially resolved BPT mapping of nearby Seyfert 2 galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 908, n. 2, p. 155, fev. 2021.
- MACIEL, W. J.; QUIREZA, C.; COSTA, R. D. D. Time variation of radial gradients in the Galactic disk: electron temperatures and abundances. *Astronomy and Astrophysics*, v. 463, n. 2, p. L13–L16, fev. 2007.
- MAIOLINO, R.; MANNUCCI, F. De re metallica: the cosmic chemical evolution of galaxies. *Astronomy and Astrophysics Review*, v. 27, n. 1, p. 3, feb 2019. ISSN 0935-4956.
- MAIOLINO, R. *et al.* AMAZE I. The evolution of the mass–metallicity relation at  $z > 3$ . *Astronomy and Astrophysics*, v. 488, n. 2, p. 463–479, sep 2008.
- MAPELLI, M. *et al.* In situ formation of SgrA\* stars via disk fragmentation: parent cloud properties and thermodynamics. *The Astrophysical Journal*, v. 749, n. 2, p. 168, abr. 2012.
- MATHIS, J. S. Ionization correction factors for low-excitation gaseous nebulae. *The Astrophysical Journal*, v. 291, p. 247–259, abr. 1985.

- MCGAUGH, S. S. H II region abundances: model oxygen line ratios. *The Astrophysical Journal*, v. 380, p. 140, out. 1991.
- MILLER, B. P. *et al.* X-ray emission from optically selected radio-intermediate and radio-loud quasars. *The Astrophysical Journal*, v. 726, n. 1, p. 20, jan 2011. ISSN 0004-637X.
- MONTEIRO, A. F.; DORS, O. L. Chemical abundances in Seyfert galaxies - VIII. Argon abundance estimates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 508, n. 2, p. 3023–3034, dez. 2021.
- NAGAO, T.; MAIOLINO, R.; MARCONI, A. Gas metallicity diagnostics in star-forming galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, v. 459, n. 1, p. 85–101, nov 2006. ISSN 0004-6361.
- NAGAO, T.; MAIOLINO, R.; MARCONI, A. Gas metallicity in the narrow-line regions of high-redshift active galactic nuclei. *Astronomy and Astrophysics*, v. 447, n. 3, p. 863–876, mar 2006. ISSN 0004-6361.
- O'DONNELL, J. E. R[<sub>nu</sub>]-dependent optical and near-ultraviolet extinction. *The Astrophysical Journal*, v. 422, p. 158, feb 1994.
- OPPENHEIMER, B. D. *et al.* Feedback and recycled wind accretion: assembling the  $z = 0$  galaxy mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 406, n. 4, p. 2325–2338, ago. 2010.
- OSTERBROCK, D.; FERLAND, G. *Astrophysics of gas Nebulae and active galactic nuclei*. [S.l.]: University Science Books, 2006. ISBN 9781891389344.
- OSTERBROCK, D. E.; MILLER, J. S. The optical emission-line spectrum of Cygnus A. *The Astrophysical Journal*, v. 197, p. 535–544, May 1975.
- PAGEL, B. E. J. *et al.* On the composition of H II regions in southern galaxies - I. NGC 300 and 1365. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 189, n. 1, p. 95–113, nov 1979. ISSN 0035-8711.
- PAGOMENOS, G. J. S.; BERNARD-SALAS, J.; POTTASCH, S. R. Neon, sulphur, and argon abundances of planetary nebulae in the sub-solar metallicity Galactic anti-centre. *Astronomy and Astrophysics*, v. 615, p. A29, jul. 2018.
- PEIMBERT, M.; COSTERO, R. Chemical abundances in galactic HII regions. *Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya*, v. 5, p. 3–22, maio 1969.
- PEIMBERT, M.; PEIMBERT, A.; DELGADO-INGLADA, G. Nebular spectroscopy: A guide on H II regions and planetary nebulae. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 129, n. 978, p. 082001, aug 2017. ISSN 0004-6280.
- PÉREZ-MONTERO, E. Ionized gaseous nebulae abundance determination from the direct method. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 129, n. 974, p. 043001, apr 2017. ISSN 0004-6280.
- PÉREZ-MONTERO, E. *et al.* The cosmic evolution of oxygen and nitrogen abundances in star-forming galaxies over the past 10 Gyr. *Astronomy and Astrophysics*, v. 549, p. A25, jan 2013.

- PÉREZ-MONTERO, E. *et al.* A bayesian-like approach to derive chemical abundances in type-2 active galactic nuclei based on photoionization models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 489, n. 2, p. 2652–2668, oct 2019. ISSN 0035-8711.
- PÉREZ-MONTERO, E. *et al.* Neon and argon optical emission lines in ionized gaseous nebulae: implications and applications. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 381, n. 1, p. 125–135, oct 2007. ISSN 0035-8711.
- PILYUGIN, L. S. Abundance determinations in H II regions. Model fitting versus  $T_e$ -method. *Astronomy and Astrophysics*, v. 399, p. 1003–1007, mar. 2003.
- PILYUGIN, L. S. *et al.* Circumnuclear regions of different BPT types in star-forming MaNGA galaxies: AGN detectability. *Astronomy and Astrophysics*, v. 639, p. A96, jul. 2020.
- PILYUGIN, L. S.; THUAN, T. X.; VÍLCHEZ, J. M. On the maximum value of the cosmic abundance of oxygen and the oxygen yield. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 376, n. 1, p. 353–360, mar. 2007.
- PILYUGIN, L. S.; VÍLCHEZ, J. M.; CONTINI, T. Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties. *Astronomy and Astrophysics*, v. 425, p. 849–869, Oct 2004.
- PRIETO, C. A.; LAMBERT, D. L.; ASPLUND, M. The forbidden abundance of oxygen in the Sun. *The Astrophysical Journal*, v. 556, n. 1, p. L63–L66, jul 2001. ISSN 0004637X.
- REVALSKI, M. *et al.* Quantifying Feedback from Narrow Line Region Outflows in Nearby Active Galaxies. I. Spatially Resolved Mass Outflow Rates for the Seyfert 2 Galaxy Markarian 573. *The Astrophysical Journal*, v. 856, n. 1, p. 46, mar. 2018.
- REVALSKI, M. *et al.* Quantifying Feedback from Narrow Line Region Outflows in Nearby Active Galaxies. II. Spatially Resolved Mass Outflow Rates for the QSO2 Markarian 34. *The Astrophysical Journal*, v. 867, n. 2, p. 88, nov. 2018.
- REVALSKI, M. *et al.* Quantifying Feedback from Narrow Line Region Outflows in Nearby Active Galaxies. III. Results for the Seyfert 2 Galaxies Markarian 3, Markarian 78, and NGC 1068. *The Astrophysical Journal*, v. 910, n. 2, p. 139, abr. 2021.
- RIFFEL, R. A. Powerful multiphase outflows in the central region of Cygnus A. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 506, n. 2, p. 2950–2962, set. 2021.
- RIFFEL, R. A. *et al.* A SINFONI view of the nuclear activity and circumnuclear star formation in NGC 4303. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 461, n. 4, p. 4192–4205, out. 2016.
- RIFFEL, R. A. *et al.* Chemical abundances in Seyfert galaxies - V. The discovery of shocked emission outside the AGN ionization axis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 501, n. 1, p. L54–L59, fev. 2021.
- RIFFEL, R. A. *et al.* AGN-starburst connection in NGC7582: Gemini near-infrared spectrograph integral field unit observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 393, n. 3, p. 783–797, mar. 2009.

- RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; RIFFEL, R. An Outflow Perpendicular to the Radio Jet in the Seyfert Nucleus of NGC 5929. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 780, n. 2, p. L24, jan. 2014.
- SALPETER, E. E. Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects. *The Astrophysical Journal*, v. 140, n. 2, p. 796, aug 1964. ISSN 0004-637X.
- SANCHEZ, S. F. *et al.* SSDSS IV MaNGA - Properties of AGN host galaxies. *Revista Mexicana de Astromia y Astrofisica*, v. 54, n. 1, p. 217–260, sep 2017. ISSN 01851101.
- SANDERS, R. L. *et al.* THE MOSDEF SURVEY: ELECTRON DENSITY AND IONIZATION PARAMETER AT  $z \approx 2.3$ . *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 816, n. 1, p. 23, dec 2015. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-637X/816/1/23>>.
- SARGENT, W. L. W. *et al.* Dynamical evidence for a central mass concentration in the galaxy M87. *The Astrophysical Journal*, v. 221, n. 9, p. 731, may 1978. ISSN 0004-637X.
- SEYFERT, C. K. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. *The Astrophysical Journal*, v. 97, n. 671, p. 28, jan 1943. ISSN 0004-637X.
- STASIŃSKA, G. Confrontation of a sample of Seyfert 2 galaxies with photoionized models. *Astronomy and Astrophysics*, v. 135, p. 341–355, jun. 1984.
- STASIŃSKA, G. Abundance determinations in HII regions and planetary nebulae. *arXiv e-prints*, p. astro-ph/0207500, jul. 2002.
- STORCHI-BERGMANN, T.; CALZETTI, D.; KINNEY, A. L. Ultraviolet to near-infrared spectral distributions of star-forming galaxies: Metallicity and age effects. *The Astrophysical Journal*, v. 429, p. 572, jul 1994. ISSN 0004-637X.
- STORCHI-BERGMANN, T.; PASTORIZA, M. G. On the Sulfur and Nitrogen Abundances in the Nucleus of Seyfert 2 and Liner Galaxies. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 102, p. 1359, dez. 1990.
- STORCHI-BERGMANN, T. *et al.* Chemical abundance calibrations for the narrow-line region of active galaxies. *The Astronomical Journal*, v. 115, n. 3, p. 909–914, mar 1998. ISSN 00046256.
- STORCHI-BERGMANN, T. *et al.* Nuclear Spirals as Feeding Channels to the Supermassive Black Hole: The Case of the Galaxy NGC 6951. *The Astrophysical Journal*, v. 670, n. 2, p. 959–967, dec 2007. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/521918>>.
- SU, K.-Y. *et al.* Feedback first: the surprisingly weak effects of magnetic fields, viscosity, conduction and metal diffusion on sub- $L^*$  galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 471, n. 1, p. 144–166, out. 2017.
- SYER, D.; CLARKE, C. J.; REES, M. J. Star-disc interactions near a massive black hole. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 250, p. 505–512, jun. 1991.
- TAYLOR, E. N. *et al.* Galaxy And Mass Assembly (GAMA): stellar mass estimates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 418, n. 3, p. 1587–1620, dec 2011. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article-lookup/doi/10.1111/j.1365-2966.2011.19536.x>>.

- THOMAS, A. D. *et al.* *The Astrophysical Journal*, v. 861, n. 1, p. L2, jun 2018. ISSN 2041-8213.
- THOMAS, A. D. *et al.* The mass–metallicity relation of local active galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 874, n. 1, p. 100, mar 2019. ISSN 1538-4357.
- THUAN, T. X.; IZOTOV, Y. I.; LIPOVETSKY, V. A. Heavy Element Abundances in a New Sample of Low-Metallicity Blue Compact Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 445, p. 108, maio 1995.
- THUAN, T. X.; PILYUGIN, L. S.; ZINCHENKO, I. A. The redshift evolution of oxygen and nitrogen abundances in emission-line SDSS galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 712, n. 2, p. 1029–1048, 2010. ISSN 15384357.
- TORRES-PEIMBERT, S.; PEIMBERT, M. Photoelectric photometry and physical conditions of planetary nebulae. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, v. 2, p. 181–207, ago. 1977.
- 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, n. 2, p. 898–913, 2004. ISSN 0004-637X.
- VAONA, Z. T.; TROCAR, Y. C.; HAMMER, F. Spectral properties of the narrow-line region in Seyfert galaxies selected from the SDSS-DR7. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 427, n. 2, p. 1266–1283, 2012. ISSN 00358711.
- VEILLEUX, S.; OSTERBROCK, D. E. Spectral classification of emission-line galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 63, n. 44, p. 295, feb 1987. ISSN 0067-0049.
- VILA-COSTAS, M. B.; EDMUNDS, M. G. The relation between abundance gradients and the physical properties of spiral galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 259, p. 121–145, Nov 1992.
- WANG, J.-M. *et al.* Star formation in self-gravitating disks in active galactic nuclei. I. Metallicity gradients in broad-line regions. *The Astrophysical Journal*, v. 739, n. 1, p. 3, set. 2011.
- WESSON, R.; LIU, X. W.; BARLOW, M. J. The abundance discrepancy - recombination line versus forbidden line abundances for a northern sample of galactic planetary nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 362, n. 2, p. 424–454, set. 2005.
- WOOSLEY, S. E.; WEAVER, T. A. The Evolution and Explosion of Massive Stars. II. Explosive Hydrodynamics and Nucleosynthesis. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 101, p. 181, nov. 1995.
- WRIGHT, E. L. A Cosmology Calculator for the World Wide Web. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 118, n. 850, p. 1711–1715, dec 2006.
- YATES, R. M.; KAUFFMANN, G.; GUO, Q. The relation between metallicity, stellar mass and star formation in galaxies: an analysis of observational and model data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 422, n. 1, p. 215–231, maio 2012.

- YATES, R. M. *et al.* Present-day mass-metallicity relation for galaxies using a new electron temperature method. *Astronomy and Astrophysics*, v. 634, p. A107, fev. 2020.
- YORK, D. G. *et al.* The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *The Astronomical Journal*, v. 120, p. 1579–1587, set. 2000.
- ZEE, L. van; HAYNES, M. P. Oxygen and Nitrogen in Isolated Dwarf Irregular Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 636, n. 1, p. 214–239, jan. 2006.
- ZEE, L. van *et al.* Spectroscopy of Outlying H II Regions in Spiral Galaxies: Abundances and Radial Gradients. *The Astronomical Journal*, v. 116, n. 6, p. 2805–2833, Dec 1998.
- ZINCHENKO, I. A. *et al.* Effective temperature of ionizing stars in extragalactic H II regions - II. Nebular parameter relationships based on CALIFA data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 483, n. 2, p. 1901–1911, fev. 2019.
- ZINCHENKO, I. A. *et al.* Characterizing the radial oxygen abundance distribution in disk galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, v. 623, p. A7, mar. 2019.
- ZURITA, A.; BRESOLIN, F. The chemical abundance in M31 from H II regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 427, n. 2, p. 1463–1481, dez. 2012.