



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/06.15.17.04-TDI

## LINHAS CORONAIAS COMO TRAÇADORAS DE OUTFLOWS EM AGNS

Marcos Antonio Fonseca Faria

Tese de Doutorado do Curso de  
Pós-Graduação em Astrofísica,  
orientada pelo Dr. Alberto  
Rodríguez Ardila, aprovada em 30  
de junho de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44SEJ9H>>

INPE  
São José dos Campos  
2021

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/06.15.17.04-TDI

## LINHAS CORONAIAS COMO TRAÇADORAS DE OUTFLOWS EM AGNS

Marcos Antonio Fonseca Faria

Tese de Doutorado do Curso de  
Pós-Graduação em Astrofísica,  
orientada pelo Dr. Alberto  
Rodríguez Ardila, aprovada em 30  
de junho de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44SEJ9H>>

INPE  
São José dos Campos  
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Faria, Marcos Antonio Fonseca.

F2251 Linhas coronais como traçadoras de outflows em AGNS / Marcos Antonio Fonseca Faria. – São José dos Campos : INPE, 2021.

xxii + 195 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/06.15.17.04-TDI)

Tese (Doutorado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientador : Dr. Alberto Rodríguez Ardila.

1. Núcleo Ativo de Galáxias. 2. Feedback. 3. Galáxias Seyfert.  
4. Linhas Espectrais. I.Título.

CDU 524.64

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE TESE DE MARCOS ANTONIO FONSECA FARIA**  
**BANCA Nº 179/2021 REG 137871/2016**

No dia 30 de junho de 2021, as 09h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Astrofísica. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Título: “LINHAS CORONAIS COMO TRAÇADORAS DE OUTFLOWS EM AGNS”**

Eu, João Braga, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros, com o consentimento dos mesmos.

Dr. João Braga - Presidente - INPE  
Dr. Alberto Rodríguez Ardila - Orientador - INPE  
Dr. André de Castro Milone - Membro Interno - INPE  
Dra. Thaisa Storchi-Bergmann - Membro Externo - UFRGS  
Dr. Rogemar André Riffel - Membro Externo - UFSM  
Dr. Tiago Vecchi Ricci - Membro Externo - UFFS



Documento assinado eletronicamente por **João Braga, Pesquisador**, em 01/07/2021, às 17:05 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **7689237** e o código CRC **DE78DFDB**.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha esposa Crediana Siqueira, por estar ao meu lado nesses últimos 17 anos e nunca ter soltado a minha mão.

Agradeço aos meus pais, Tereza Rocha e Antonio Donizetti, e a minha irmã Cássia Faria, por serem os primeiros professores da minha vida e contribuírem muito para meu crescimento pessoal.

Agradeço ao meu orientador e amigo Dr. Alberto Rodríguez Ardila, pelos infinitos ensinamentos, pela paciência e companhia nas corridas.

Aos meus amigos do INPE: Aysse, Eduardo, Frederico, Lorena, Manoel, Rafael, Samantha, Tábata e Yasmin. Que não mediram esforços para me ajudar quando precisei.

Ao meu amigo Murilo Marinello pela amizade de mais de 10 anos, desde a época dos cursos de graduação e mestrado.

Aos meus amigos do grupo de AGNs: Fernando, Bárbara, Denimara, Raquel, Vinícius, Gabriela, Daniel, Yaherlyn e Panda. Em especial, ao Luís Gabriel pela contribuição nas correções desta tese.

A Marcela Contini, pelas contribuições nos resultados da tese e do artigo.

Aos meus professores da DAS, pelo incentivo, atenção e dedicação, durante minha passagem pelo INPE.

Agradeço à CAPES e à Divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo suporte financeiro e estrutural para a realização desta pesquisa.



## RESUMO

É amplamente aceito que escoamentos de gás, ou *outflows*, em escalas galácticas estão presentes na maior parte dos núcleos ativos de galáxias (AGN). Simulações numéricas incorporam esses escoamentos como peça fundamental para entender o papel da atividade nuclear na vida evolutiva de galáxias. Estudos sobre *outflows* têm sido tradicionalmente realizados em quasares e radiogaláxias. No entanto, AGNs com luminosidade moderada ( $L_{\text{bol}} < 10^{44}$  erg s $^{-1}$ , onde  $L_{\text{bol}}$  é a luminosidade bolométrica) e jatos de baixa potência ( $P < 10^{23}$  W Hz $^{-1}$ ) têm sido negligenciados, embora representem uma grande fração dos AGNs detectados em levantamentos. Questões básicas tais como se nesses objetos os escoamentos de gás são capazes de cessar a formação estelar e qual o papel do jato nesse processo permanecem em aberto. Esta tese visa contribuir nessa discussão utilizando de forma pioneira linhas coronais como traçadoras genuínas da componente ionizada dos *outflows*. Estamos interessados em determinar o papel do jato na geração desses escoamentos, assim como caracterizar sua extensão, massa, taxa e energia cinética e suas condições físicas (extinção, densidade e temperatura). A nossa amostra é composta das galáxias Seyfert 2 Circinus, IC 5063, NGC 5643, NGC 3393, NGC 5728, ESO 428-G14 e NGC 1068. Para a nossa análise, utilizamos o instrumento MUSE (*Multi Unit Spectroscopic Explorer*) do VLT (*Very Large Telescope*), que fornece cerca de 90000 espectros para cada objeto em um campo de  $1' \times 1'$ . Os espectros possuem grande cobertura em comprimento de onda (4700 – 9300 Å) e resolução espectral  $\sim 2500$ . Para a análise dos dados do MUSE foram produzidas rotinas em PYTHON que através do ajuste de componentes gaussianas calculam o fluxo, posição e largura das linhas, e derivam a temperatura, densidade e cinemática em todos os spaxels de um cubo. A análise dos espectros permitiu redefinir o tamanho da região emissora de linhas coronais. Detectamos, pela primeira vez na literatura, emissão coronal nas linhas de [Fe VII] e [Fe X] em escalas de quiloparsecs. Os resultados indicam tamanhos de até uma ordem de grandeza maiores daqueles previamente relatados. Observamos que o gás coronal estendido está localizado na parte interna do cone de ionização e está dominado por movimentos não rotacionais. Também, apresenta maior turbulência (FWHM  $> 200$  km s $^{-1}$ ), e está associado a regiões de maiores valores de densidade e temperatura eletrônica ( $n_e > 300$  cm $^{-3}$ ,  $T_e > 13000$  K, respectivamente). Encontramos uma associação evidente entre o eixo da emissão coronal e os eixos da emissão em rádio e raio-X. Interpretamos esse resultado em termos de choques gerados pela passagem do jato, aquecendo o gás e gerando a emissão coronal estendida. Modelos que incorporam fotoionização pela fonte central e choques confirmam esse cenário. Derivamos taxas de *outflow* entre 0,042 e 4,3 M $_{\odot}$  ano $^{-1}$  e uma eficiência cinética entre 0,0074% e 0,64%. Consideramos os valores de taxa de *outflows* e eficiência cinética como limites inferiores. Os resultados indicam que os *outflows* associados à emissão coronal, e, portanto, ao jato rádio-emissor se mostram relevantes, mas não suficientes para expulsar o gás de formação estelar.

Palavras-chave: Núcleo Ativo de Galáxias. Feedback. Galáxias Seyfert. Linhas Espectrais.



# CORONAL LINES AS TRACERS OF OUTFLOWS IN AGNS

## ABSTRACT

It is widely accepted that outflows on galactic scales are present in most active galaxy nuclei (AGN). Numerical simulations incorporate these outflows as a key process to understand the role of nuclear activity in the evolutionary life of galaxies. Outflow studies have traditionally been carried out in quasars and radio galaxies. However, AGNs with moderate luminosity ( $L_{\text{bol}} < 10^{44}$  erg s $^{-1}$ , where  $L_{\text{bol}}$  is the bolometric luminosity) and low power jets ( $P < 10^{23}$  W Hz $^{-1}$ ) have been neglected, although they represent a large fraction of the AGNs detected in surveys. Basic questions such as whether outflows in these objects are able to quench star formation and what role the jet plays in this process remain open. This thesis aims to contribute to this discussion using for the first time coronal lines as genuine tracers of the ionizing component of the outflows. We are interested in determining the role of the jet in generating these outflows, as well as characterizing its extension, mass, rate and kinetic energy and its physical conditions (extinction, density and temperature). Our sample is composed of the Seyfert 2 galaxies Circinus, IC 5063, NGC 5643, NGC 3393, NGC 5728, ESO 428-G14 and NGC 1068. For our analysis, we used the MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer) instrument of the VLT (Very Large Telescope), which provides about 90,000 spectra for each object in a  $1' \times 1'$  field of view. The spectra have large wavelength coverage (4,700 – 9,300 Å) and spectral resolution  $\sim 2,500$ . For the analysis of the MUSE data, in-house PYTHON routines were employed to calculate the flux, position and width of the lines, and to derive the temperature, density and kinematics by means of Gaussian components fit to all the spaxels of the cubes. The analysis of the spectra allowed redefining the size of the emitting region of the coronal lines. We detected, for the first time in the literature, coronal emission extended to kiloparsec scales in the lines of [Fe VII] and [Fe X]. The results indicate sizes up to an order of magnitude larger than those previously reported. We found that the extended coronal gas is located in the inner part of the ionization cone and is dominated by non-rotational motions. It also shows greater turbulence (FWHM  $> 200$  km s $^{-1}$ ), and is associated with regions of higher density and electronic temperature values ( $n_e > 300$  cm $^{-3}$ ,  $T_e > 13,000$  K, respectively). We found a strong interplay between the axis of coronal emission and the axes of radio and X-ray emission. We interpret this result in terms of shocks generated by the passage of the jet, heating the gas and generating the extended coronal emission. Models that incorporate photoionization by the central source and shocks confirm this scenario. We derive outflow rates between 0.042 and 4.3  $M_{\odot}$  yr $^{-1}$  and a kinetic efficiency between 0.0074% and 0.64%. We consider the outflow rate and kinetic efficiency values as lower limits. The results indicate that the outflows associated with coronal emission, and therefore with the radio-emitting jet, are relevant but not sufficient to quenching the star-formation.

Keywords: Active Galactic Nuclei. Feedback. Seyfert galaxies. Spectral Lines.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1	3
1.2	5
1.3	9
1.4	11
1.5	14
1.6	17
2.2	28
2.1	35
2.3	36
2.4	37
3.1	42
3.3	46
3.2	50
3.4	51
3.5	52
4.1	55
4.2	56
4.3	57
4.4	58
4.5	59
4.10	64
4.6	82
4.7	83
4.8	84
4.9	85
4.11	86
4.12	87

4.13	Modelo de rotação em projeção 3D em conjunto com a linha de emissão de [Fe VII] $\lambda 6087$ .	88
4.14	Mapas de canais para linha de emissão $H\alpha$ .	89
4.15	Mapas de canais para linha de emissão [O III] $\lambda 5007$ .	90
4.16	Emissão rádio em Circinus.	91
4.17	Mapas de canais para emissão coronal da galáxia Circinus.	92
4.18	Mapa de fluxos da linha de [Fe VII] $\lambda 6087$ após ajuste de 4 componentes gaussianas.	93
4.19	Mapa de velocidades em Circinus, separada em 4 componente da linha de [O III] $\lambda 5007$ .	94
4.20	Mapa posição-velocidade para Circinus.	95
4.21	Projeção 3D das componentes de velocidade de [Fe VII] $\lambda 6087$ e [O III] $\lambda 5007$ .	96
4.22	Mapas de momentos para as linhas de baixa ionização, $H\alpha$ , [O I] $\lambda 6300$ , [S II] $\lambda 6716$ e [N II] $\lambda 6583$ .	97
4.23	Mapas de momentos para as linhas de: [O III] $\lambda 5007$ , [S III] $\lambda 9069$ , He II $\lambda 5412$ e [Ar III] $\lambda 7136$ .	98
4.24	Mapa de momentos para as linhas de alta ionização [Fe VII] $\lambda 6087$ e [Ar V] $\lambda 7006$ .	99
4.25	Mapa de momentos para as linhas de [Fe X] $\lambda 6375$ .	100
4.26	Projeção dos ângulos sólidos utilizados para estimar o fluxo de $H\beta$ .	101
4.27	Mapa da linha de emissão de [Fe VII] $\lambda 6087$ e os contornos das doze regiões utilizadas no código SUMA.	101
4.28	Os perfis de $T_e$ , $n_e$ , e a abundância dos íons mais significativos ao longo das nuvens na região R1a calculados por um modelo RD.	102
4.29	Os perfis de $T_e$ , $n_e$ , e a abundância dos íons mais significativos ao longo das nuvens na região R1b calculados por um modelo SD.	103
5.1	Mapas de fluxos da emissão coronal em IC 5063.	122
5.2	Mapas de fluxos da emissão coronal em NGC 5643.	123
5.3	Mapas de fluxos da emissão coronal em NGC 3393.	124
5.4	Mapas de fluxos da emissão coronal em NGC 5728.	125
5.5	Mapas de fluxos da emissão coronal em ESO 428.	126
5.6	Mapas de fluxos da emissão coronal em NGC 1068.	127
5.7	Gráfico da luminosidade bolométrica versus a extensão coronal.	128
5.8	Diagrama BPT para as galáxias.	129
5.9	Mapas de extinção com contornos em rádio.	130

6.1	Mapas de razões de linhas para as galáxias. . . . .	150
6.2	Mapas da cinemática do gás de IC 5063. . . . .	151
6.3	Mapas de canais para emissão coronal da galáxia IC 5063. . . . .	152
6.4	Mapas da cinemática do gás de NGC 5643. . . . .	153
6.5	Mapas de canais para emissão coronal da galáxia NGC 5643. . . . .	154
6.6	Mapas da cinemática do gás de NGC 3393 . . . . .	155
6.7	Mapas de canais para emissão coronal da galáxia NGC 3393. . . . .	156
6.8	Mapas da cinemática do gás de NGC 5728. . . . .	157
6.9	Mapas de canais para emissão coronal da galáxia NGC 5728. . . . .	158
6.10	Mapas da cinemática do gás de ESO 428. . . . .	159
6.11	Mapas de canais para emissão coronal da galáxia ESO 428-14. . . . .	160
6.12	Mapas da cinemática do gás de NGC 1068. . . . .	161
6.13	Mapas de Canais para emissão coronal da galáxia NGC 1068. . . . .	162
6.14	Mapas de densidade eletrônica para as galáxias. . . . .	163
6.15	Mapas da temperatura para as galáxias da amostra. . . . .	164



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Amostra final de objetos, juntamente com características básicas de cada alvo. . . . .	24
2.2 Informações observacionais das galáxias estudadas. . . . .	27
2.3 Passos para redução padrão do MUSE. . . . .	30
3.1 Tamanho final da imagem, re-binagem do cubo de dados e valores de extinção utilizado para cada galáxia da amostra. . . . .	40
4.1 Potencial de ionização para diferentes íons. . . . .	75
4.2 Comparação dos cálculos das razões de linhas em relação a $H\beta$ com a média dos valores observados nas diferentes regiões. . . . .	79
4.3 Parâmetros de entrada dos modelos para cada uma das regiões analisadas. . . . .	80
4.4 Valores médios de $T_e$ e $n_e$ , $H\beta_{tot}$ e pesos $w$ são calculados para as regiões R1a, R1b, R2a, R2b, R3 e R4, modeladas com SUMA. . . . .	80
4.5 Valores médios de $T_e$ e $n_e$ , $H\beta_{tot}$ e pesos $w$ são calculados para as regiões R5a, R5b, R6a, R6b, R7 e R8, modeladas com SUMA. . . . .	81
5.1 Informações observacionais da extensão coronal das galáxias estudadas. . . . .	107
5.2 Valores da extensão coronal máxima encontrada para as linhas de emissão de [Fe VII] e [Fe X]. . . . .	113
5.3 Informações de distância, luminosidade e extensão da emissão coronal da amostra das galáxias. . . . .	115
5.4 Informações observacionais da extensão coronal das galáxias estudadas. . . . .	117
6.1 Seleção de galáxias estudadas com as informações de distância, luminosidade e extensão da emissão coronal. . . . .	147
6.2 Taxas e potência cinética dos <i>outflows</i> observados neste trabalho e encontradas na literatura. . . . .	148
A.1 Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R1a ( $\Delta X/\Delta Y$ : 8"-12"/10"-14"). . . . .	203
A.2 Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R1b $\Delta X/\Delta Y$ : 12"-15"/14"-17". . . . .	204
A.3 Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R2a $\Delta X/\Delta Y$ : 18"-20"/14"-16". . . . .	204

A.4	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R2b $\Delta X/\Delta Y$ : 17"-19"/17"-19".	205
A.5	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R3 $\Delta X/\Delta Y$ : 20"-25"/16"-19".	205
A.6	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R4 $\Delta X/\Delta Y$ : 4"-7"/8"-11".	206
A.7	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R5a $\Delta X/\Delta Y$ : 11"-14"/5"-7".	206
A.8	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R5b $\Delta X/\Delta Y$ : 15"-19"/5"-8".	207
A.9	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R6a $\Delta X/\Delta Y$ : 0"-1"/0"-1".	207
A.10	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R6b $\Delta X/\Delta Y$ : 3"-4"/4"-5".	208
A.11	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R7 $\Delta X/\Delta Y$ : 0"-5"/15"-20".	208
A.12	Valores de FWHM (em $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R8 $\Delta X/\Delta Y$ : 15"-25"/0"-4".	209

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGN	–	Active galactic nucleus
ALMA	–	Atacama Large Millimeter Array
BLR	–	Broad Line Region
CL	–	Coronal Line
ESO	–	European Southern Observatory
FITS	–	Flexible Image Transport System
FOV	–	Field-of-View
FR I	–	galáxias Fanaroff-Riley de tipo 1
FR II	–	galáxias Fanaroff-Riley de tipo 2
FWHM	–	Full Width at Half Maximum
HST	–	Hubble Space Telescope
GMOS	–	Gemini Multi-Object Spectrograph
IFU	–	Integral Field Units
IP	–	Ionization Potential
LINER	–	Low Ionization Nuclear Emission Region
NED	–	NASA/IPAC Extragalactic Database
NIFS	–	Near-Infrared Integral Field Spectrograph
NIR	–	Near-Infrared
NLR	–	Narrow-Line Radio Galaxies
quasar	–	quasi-stellar radio source
QSOs	–	Quasi-Stellar Object
SDSS	–	Sloan Digital Sky Survey
SED	–	Spectral Energy Distribution
SMBH	–	Super Massive Black Hole
SOAR	–	Southern Astrophysical Research Telescope
WSRT	–	Westerbork Synthesis Radio Telescope



# SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Núcleos Ativos de Galáxias	1
1.2 A região de linhas largas	2
1.3 A região de linhas estreitas	4
1.4 Classificação dos AGNs	4
1.5 Buraco negro supermassivo	7
1.6 Modelo unificado	8
1.7 Relação entre massa do bojo, massa do buraco negro e dispersão de velocidade estelar	9
1.8 Efeitos de <i>feedback</i> em AGNs	12
1.9 Processos de <i>outflows</i> em AGNs	14
1.10 A utilização de dados IFUs nos estudos de <i>feeding</i> e <i>feedback</i> em AGNs	16
1.10.1 Levantamentos utilizando IFUs	18
1.11 Objetivos do trabalho	20
<b>2 DESCRIÇÃO DA AMOSTRA DE DADOS UTILIZADOS</b>	<b>23</b>
2.1 Espectroscopia de campo integral	24
2.1.1 Rede de microlentes	25
2.1.2 Conjunto de fibras	25
2.1.3 Fatiamento de imagens	25
2.2 Espectrógrafo MUSE	26
2.3 Processos para redução dos dados do MUSE	27
2.4 Descrição individual dos objetos da amostra	30
2.4.1 Circinus	30
2.4.2 IC 5063	31
2.4.3 NGC 5643	32
2.4.4 NGC 3393	32
2.4.5 NGC 5728	33
2.4.6 ESO 428-G14	33
2.4.7 NGC 1068	34
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
3.1 Análise inicial do cubo	39

3.2	Corte, re-binagem e correção por avermelhamento do cubo . . . . .	39
3.3	Determinação da posição do AGN . . . . .	40
3.4	Subtração do contínuo estelar . . . . .	41
3.4.1	STARLIGHT . . . . .	41
3.5	Ajuste das linhas de emissão . . . . .	44
3.6	Aplicação dos modelos de fotoionização . . . . .	47
<b>4</b>	<b>GALÁXIA CIRCINUS . . . . .</b>	<b>53</b>
4.1	Distribuição do gás de baixa, média e alta ionização para galáxia Circinus	54
4.2	Primeira detecção de gás coronal estendido no cone de Circinus . . . . .	55
4.3	Distribuições das razões de linhas . . . . .	59
4.4	Condições físicas do gás . . . . .	60
4.5	Cinemática estelar e do gás ionizado em Circinus . . . . .	62
4.5.1	Cinemática estelar . . . . .	62
4.5.2	Cinemática do gás . . . . .	63
4.5.3	Mapas de canais das linhas de $H\alpha$ , [O III] e [Fe VII] . . . . .	65
4.5.4	Componentes de linhas espectrais com alto deslocamento para o Azul.	67
4.5.5	Momentos para as linhas de baixa e média ionização . . . . .	68
4.5.6	Mapas de momentos para as linhas de alta ionização . . . . .	69
4.6	Cálculo da taxa de <i>outflow</i> . . . . .	71
4.6.1	Cálculo do <i>outflow</i> em um modelo de estrutura bicônica . . . . .	71
4.6.2	Cálculo do <i>outflow</i> a partir do fluxo de $H\beta$ . . . . .	72
4.6.3	Estimativa do fluxo de $H\beta$ a partir de uma fonte central. . . . .	73
4.7	Modelando as razões de linhas . . . . .	74
4.7.1	Detalhes dos cálculos do SUMA . . . . .	77
4.8	Discussão para galáxia Circinus . . . . .	79
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DA EMISSÃO CORONAL DA AMOSTRA DE GALÁXIAS . . . . .</b>	<b>105</b>
5.1	Extensão da emissão coronal . . . . .	108
5.1.1	IC 5063 . . . . .	108
5.1.2	NGC 5643 . . . . .	109
5.1.3	NGC 3393 . . . . .	110
5.1.4	NGC 5728 . . . . .	111
5.1.5	ESO 428-14 . . . . .	111
5.1.6	NGC 1068 . . . . .	112
5.2	Diagrama BPT . . . . .	114
5.3	Relação entre a emissão rádio e a emissão coronal . . . . .	116

<b>6</b>	<b>PROPRIEDADES FÍSICAS DO GÁS</b>	<b>131</b>
6.1	Grau de ionização do gás	131
6.2	Cinemática do gás	133
6.2.1	IC 5063	134
6.2.2	NGC 5643	135
6.2.3	NGC 3393	136
6.2.4	NGC 5728	137
6.2.5	ESO 428	139
6.2.6	NGC 1068	139
6.2.7	Conclusões gerais para a cinemática do gás ionizado	141
6.3	Densidade do gás	142
6.4	Temperatura do gás	144
6.5	Cálculo das taxas e massas dos <i>outflows</i>	145
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b>	<b>165</b>
7.1	Galáxia Circinus	165
7.2	IC 5063	166
7.3	NGC 5643	167
7.4	NGC 3393	168
7.5	NGC 5728	169
7.6	ESO 428	170
7.7	NGC 1068	170
7.8	Conclusões gerais	171
7.9	Perspectivas futuras	172
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>175</b>
	<b>ANEXO A - RESULTADOS DO SUMA PARA CADA REGIÃO</b>	<b>203</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Núcleos Ativos de Galáxias

O termo Núcleo Ativo de Galáxia (AGN, do inglês *Active Galactic Nucleus*) refere-se a um buraco negro supermassivo ( $> 10^5 M_{\odot}$ ) no centro de uma galáxia alimentado por acréscimo de matéria formando um disco de acreção (NETZER, 2015). Em um AGN típico, a luminosidade total emitida pelo núcleo na região visível é comparável ou superior (até 100 vezes) à luminosidade de sua galáxia hospedeira ( $\sim 10^{11} L_{\odot}$ ) (PETERSON, 1997). Galáxias com buracos negros centrais que não apresentam evidências de acreção, são chamadas de normais ou de galáxias inativas.

Nos espectros de AGNs destacam-se a presença de linhas em emissão largas e estreitas cobrindo um amplo intervalo de ionização e um contínuo de natureza não-estelar, que se estende por uma ampla faixa de frequências, desde raios-gama até a região do rádio. Entre os objetos que se encaixam nessa categoria encontram-se os quasares, as galáxias Seyfert e os LINERs (*Low Ionization Nuclear Emission Region*). Estes últimos constituem o grupo de AGN mais comum e de menor luminosidade (HO, 2008).

Do ponto de vista espectroscópico, os AGNs se classificam em dois grandes grupos: objetos de tipo I e objetos de tipo II. Os primeiros se caracterizam pela presença de linhas em emissão permitidas, com larguras sugerindo movimentos do gás emissor ao redor da fonte central com velocidades entre  $10^3 \text{ km s}^{-1}$  e  $10^4 \text{ km s}^{-1}$ . Estas linhas se originam em uma região conhecida como a região de linhas largas. Também, são observadas linhas estreitas permitidas e proibidas tanto de alta como de baixa ionização. O FWHM (*Full Width at Half Maximum*) típico destas linhas encontra-se entre  $300 \text{ km s}^{-1}$  e  $700 \text{ km s}^{-1}$  e são produzidas na chamada região de linhas estreitas. Ainda, objetos de tipo I possuem um núcleo de aparência pontual no óptico/ultravioleta até raios-X. Objetos de tipo II possuem somente linhas em emissão estreitas permitidas e proibidas, com FWHM similares aos observados nos objetos de tipo I. Apresentam uma fonte pontual em raios-X. No óptico/infravermelho o contínuo em emissão é dominado pela população estelar da galáxia hospedeira (RIFFEL et al., 2019).

No painel superior da Figura 1.1 é apresentado o espectro óptico de NGC 3783, um AGN de tipo I. Podemos facilmente visualizar linhas em emissão produzidas na região de linhas largas (BLR, do inglês *Broad Line Region*), tais como a componente larga de  $H\alpha$  e  $H\beta$ . Também, observam-se linhas estreitas de  $[\text{O III}] \lambda 5007$ ,

[Fe VII]  $\lambda 6087$ , [O I]  $\lambda 6300$ , [S II]  $\lambda\lambda 6716, 6731$  entre outras. No painel inferior da mesma figura encontra-se o espectro da galáxia de tipo II Mrk 573. Pode-se observar claramente que o espectro é dominado somente pela presença de linhas estreitas.

É amplamente aceita a hipótese de que o acréscimo de gás ao redor de um buraco negro supermassivo (SMBH, do inglês *Supermassive black hole*) com massa  $> 10^5 M_{\odot}$  localizado no centro do AGN é a origem principal do fenômeno (NETZER, 2015; PETERSON, 1997). O fluxo de matéria em acréscimo originaria o contínuo em emissão de raios-X, UV e óptico que posteriormente ioniza o gás circunuclear tanto na região de linhas largas quanto na região de linhas estreitas e pode, também, ser a origem de ventos e jatos usualmente observados nesses objetos.

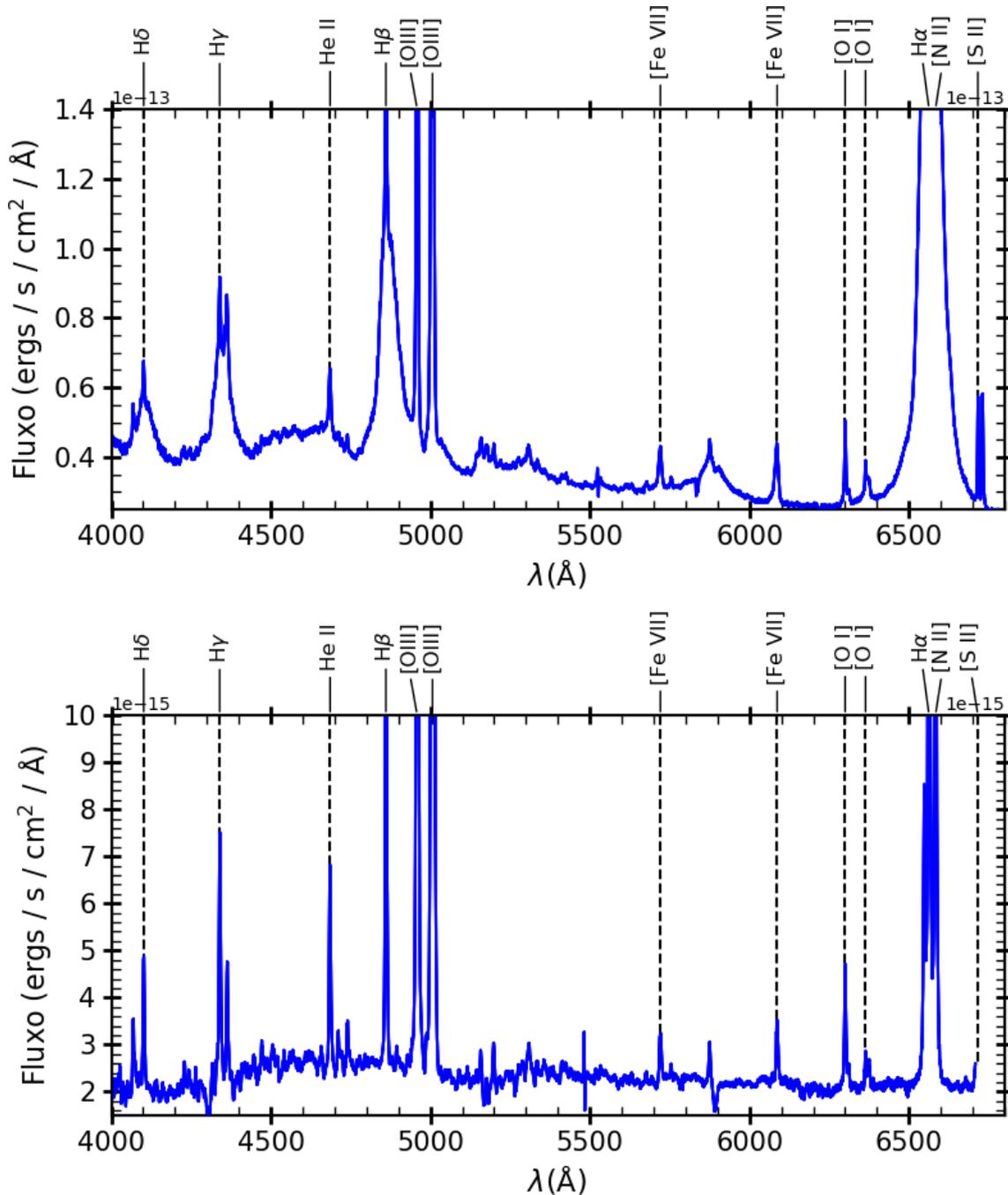
## 1.2 A região de linhas largas

A região de linhas largas, também conhecida como BLR, é a região localizada a uma distância menor que 0,1 pc do buraco negro supermassivo. O gás que compõe BLR está principalmente em movimento kepleriano, podendo também apresentar movimentos de *inflows* e *outflows* (DU et al., 2016). Caracteriza-se pela emissão de linhas que sugerem velocidades do gás entre 1000 a 10000  $\text{km s}^{-1}$  (ANTONUCCI, 1993; PADOVANI et al., 2017; ALMEIDA; RICCI, 2017). Em alguns casos pode chegar a valores de 30000  $\text{km s}^{-1}$  (PETERSON, 1997). A densidade do gás da BLR é da ordem ou maior que  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  (ALLOIN, 2006).

As linhas de emissão da BLR se restringem apenas às linhas permitidas, uma vez que a densidade do gás é muito alta, desfavorecendo transições proibidas (HICKOX; ALEXANDER, 2018). Os espectros produzidos pela BLR possuem linhas observadas desde o ultravioleta até o infravermelho próximo. Além de linhas intensas de H I, He I, Ca IV e Mg II, destaca-se a emissão de Fe II, o íon que mais contribui em número de linhas nessa região, com mais de  $\sim 10^5$  transições, formando um pseudo-contínuo do ultravioleta ao óptico (MARINELLO et al., 2016; PANDA, 2020). A utilização da técnica de mapeamento por reverberação (RM, do inglês *reverberation mapping*) na BLR tem permitido obter a localização do gás emissor. Os resultados mostram que o gás da BLR encontra-se a distâncias entre  $10^{-3} - 10^{-1}$  pc do AGN (NETZER, 2013). O RM tem permitido também estimar a massa do SMBH, principalmente com a utilização das linhas de emissão largas tais como H $\alpha$ , H $\beta$ , Ly $\alpha$ , C IV  $\lambda 1549$ , He II  $\lambda 1640$ , He II  $\lambda 4686$  e Mg II 2798. Foram encontradas massas no intervalo de  $10^6 - 10^9 M_{\odot}$ .

Recentemente, com observações realizadas utilizando o instrumento GRAVITY (ABUTER et al., 2017), foi possível resolver e modelar a BLR em AGNs próximos.

Figura 1.1 - Espectros de uma galáxia tipo I e uma galáxia tipo II.



No painel superior, observa-se o espectro óptico da galáxia tipo I NGC 3783. No painel inferior, o espectro correspondente à galáxia tipo II Mrk 573. A posição das linhas em emissão mais importantes estão sinalizadas por linhas verticais tracejadas. Repare a presença de componentes largas nas linhas de H $\alpha$ , H $\beta$  e H $\gamma$  em NGC 3783, enquanto que em Mrk 573 somente são observadas as componentes estreitas. Os espectros foram obtidos no telescópio SOAR por A. Rodríguez-Ardila.

Por exemplo, no estudo de NGC 3783 (AMORIM et al., 2021) foi encontrado que a BLR é bem descrita por um disco espesso em rotação com uma distribuição radial de nuvens. O raio médio dessa estrutura é de 16 dias-luz, o que está de acordo com o intervalo de tempo de 10 dias medido pelo mapeamento por reverberação. Também, as observações permitiram determinar o tamanho da região emissora de poeira quente, sendo estimada em 0,14 pc. Resultados similares em outros objetos de tipo I apontam para BLRs com tamanhos compatíveis com os derivados usando RM. No caso do quasar 3C 273, foi encontrada uma BLR ao redor de um buraco negro de  $3 \times 10^8 M_{\odot}$  formando um disco de 150 dias-luz. O eixo de rotação do disco está alinhado e no mesmo ângulo de posição que o jato rádio-emissor (STURM et al., 2018).

### 1.3 A região de linhas estreitas

A região de linhas estreitas (NLR, do inglês *Narrow Line Region*), é a parcela de gás externa a BLR e ao toróide (CAPETTI et al., 1996), resolvida espacialmente e que se estende até distâncias de centenas de parsecs da fonte central. Em geral, possui uma estrutura bicônica que é diretamente iluminada pela fonte central. Do ponto de vista espectral, possui linhas de emissão permitidas e proibidas, com FWHM de 300 a  $700 \text{ km s}^{-1}$  (PADOVANI et al., 2017).

O gás da NLR possui uma temperatura típica da ordem de  $10^4 \text{ K}$  e densidade no intervalo  $10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$  (ALLOIN, 2006). O gás da NLR pode ser fortemente perturbado pela passagem de um jato rádio-emissor e pela ação de ventos provindos do disco de acreção. Em ambos os casos, trata-se de um efeito de *feedback*, sendo um elemento importante e necessário para os modelos de evolução das galáxias.

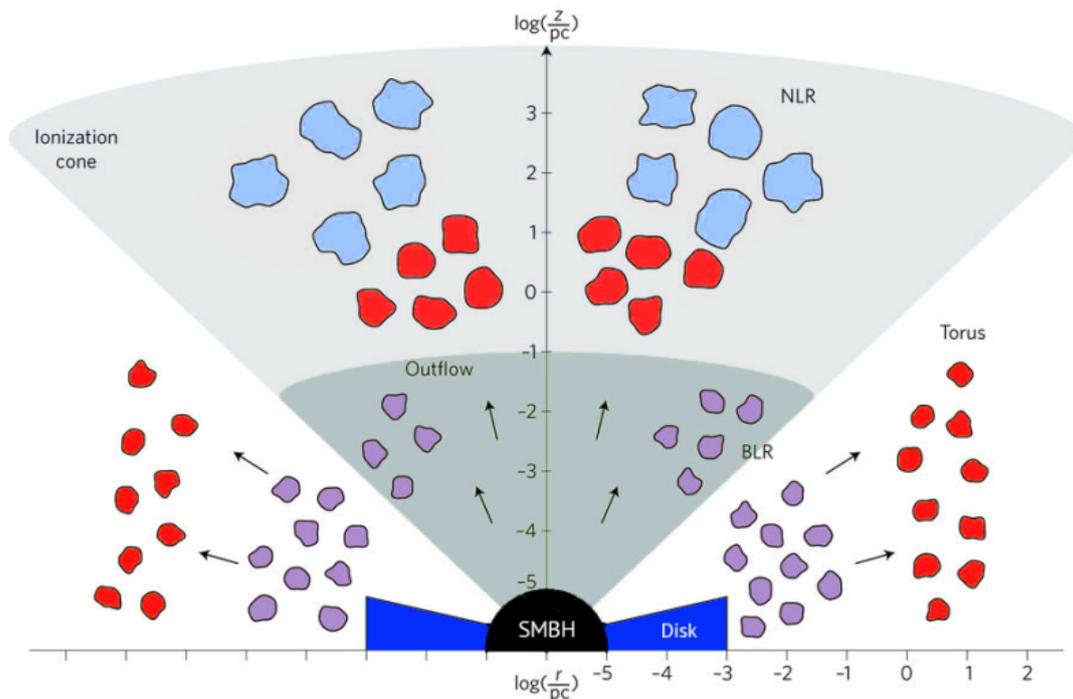
Na Figura 1.2, é apresentado um *cartoon* que ilustra os componentes de um AGN, com destaque na BLR e NLR. Observa-se também a estrutura do cone de ionização, a região de toróide de gás e poeira e a fonte central. As distâncias estão apresentadas em escala logarítmica.

### 1.4 Classificação dos AGNs

A classificação de AGNs é um conceito muito amplo e está fora do escopo desse trabalho (BLANDFORD et al., 1990; NETZER, 2013; PETERSON, 1997). Sendo assim, apresentamos aqui apenas um resumo da classificação mais comum utilizada, ressaltando-se as principais divisões.

**Galáxias Seyfert:** São galáxias tipicamente espirais (HECKMAN, 1978; WEHINGER;

Figura 1.2 - Ilustração do modelo esquemático para as regiões BLR e NLR de um AGN.



Fonte: Adaptada de Almeida e Ricci (2017).

WYCKOFF, 1977), possuem um núcleo muito brilhante e magnitude bolométrica,  $M_{bol}$ , da ordem de  $-21,5 + 5 \log h_0$ , onde  $h_0$  é a constante de Hubble dividida por 100. Seu espectro possui fortes linhas de emissão, uma galáxia hospedeira resolvida opticamente, além de uma variabilidade da luminosidade em curtos períodos de tempo. De acordo com seu espectro elas são classificadas em dois tipos: Seyfert 1 apresentam principalmente linhas permitidas, sendo elas largas e estreitas que se sobrepõem, enquanto Seyfert 2 apresentam espectros dominados por linhas de emissão estreitas sendo elas permitidas e proibidas.

**Quasares:** É a classe de AGN mais luminosos e distantes, chegando a  $z \sim 7$ , quando o Universo estava apenas com  $7 \times 10^8$  anos de idade (VENEMANS et al., 2017; BAÑADOS et al., 2018). Apresentam um contínuo de tipo não estelar e emissão de linhas largas e estreitas. Quanto à luminosidade, não existe uma linha divisória clara entre galáxias Seyfert e Quasares, sendo que alguns autores sugerem que a linha divisória está em torno de uma luminosidade bolométrica de  $\sim 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$  (NETZER, 2013; ZAKAMSKA et al., 2016).

**Radiogaláxias:** São galáxias elípticas tipicamente gigantes com emissão rádio es-

tendida em escalas de centenas de quiloparsecs. A potência do jato-rádio atinge valores maiores que  $10^{37}$  W na faixa de 10 MHz a 100 MHz (RAWLINGS; SAUNDERS, 1991). Podem apresentar linhas de emissão largas ou estreitas, subdividindo essa classe em dois tipos: radiogaláxias emissoras de linhas estreitas e radiogaláxias de linhas largas. Possuem emissão de jatos relativísticos que se estendem em direções opostas em relação ao núcleo da galáxia. Esses jatos interagem com a região mais densa do meio interestelar/intergaláctico formando estruturas de lóbulos de rádio.

A morfologia dos jatos e dos lóbulos é usualmente utilizada para classificar as radiogaláxias nos tipos FRI e FR II (FANAROFF; RILEY, 1974). Nas primeiras, o pico de emissão encontra-se no núcleo, diminuindo gradativamente ao se afastar do AGN. Nas segundas, a emissão rádio aumenta seu brilho em regiões mais distantes do AGN, principalmente na borda externa do jato. Existe uma terceira classificação chamada “FR 0”, sendo uma nova população de radiogaláxias caracterizadas por uma luminosidade da fonte central semelhantes às FR Is, mas com uma emissão rádio menos estendida, cerca de 100 vezes menor (GHISELLINI, 2011).

Quanto à potência da emissão rádio, existe uma divisão entre objeto com forte emissão em rádio (*radio-loud*) e um objeto com baixa emissão rádio (*radio-quiet*). Essa divisão vem dada pelo valor  $\log_{10} R = 1$ , onde o termo R é a razão do fluxo rádio em 6 cm e o fluxo óptico em 4400 Å (KELLERMANN et al., 1989).

**Blazares:** Objetos com núcleo muito brilhante em uma grande variedade de comprimentos de onda desde frequências de rádio até raios- $\gamma$  (energia chegando a TeV). Caracterizam-se também pela alta variabilidade na luminosidade em curto intervalo de tempo (horas a dias) ao longo de todo espectro eletromagnético. Possuem um espectro com alta polarização, emitindo fortemente em rádio, com ausência de linhas de emissão e absorção. Uma hipótese bem aceita na comunidade científica é que os Blazares possuem o seu jato rádio com orientação  $< 20^\circ$  em relação à linha da visada (PADOVANI, 2017).

**LINERs:** São galáxias com espectros óptico e infravermelho dominados pela presença de linhas intensas de baixa ionização tais como [S II]  $\lambda\lambda 6716, 6731$  e [O I]  $\lambda 6300$  (HECKMAN, 1980). Apresentam em seu espectro um contínuo dominado por população estelar. Os LINERs possuem natureza semelhante às Seyfert, porém com uma luminosidade muito menor. A luminosidade das linhas de emissão  $H\alpha$  e [O III]  $\lambda 5007$  é da ordem de  $10^5 - 10^6 L_\odot$  (KAUFFMANN et al., 2003).

Uma divisão comumente utilizada para separar Seyfert e LINERs está relacionada

com o nível de ionização determinado pela razão  $[\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta$ . Sendo assim, quando um objeto possui uma razão  $[\text{O III}] 5007 / \text{H}\beta$  entre 3 – 5 vezes menor que AGNs de alta luminosidade o mesmo é classificado como LINER.

A natureza dos LINERS tem sido o foco de grande debate na última década. Por exemplo, [Stasińska et al. \(2008\)](#) argumentam que os espectros de uma fração de LINERS podem ser explicadas como sendo ionizada por estrelas na fase posterior à fase do ramo assintótico das gigantes e anãs brancas.

### 1.5 Buraco negro supermassivo

Buracos negros são objetos muito investigados em astrofísica, sendo um dos ingredientes mais importantes para os modelos de evolução de galáxias. Estima-se que todas as galáxias com bojo clássico possuam um buraco negro supermassivo na sua região nuclear, com massa entre  $10^6$  a  $10^9 M_{\odot}$  ([DOKUCHAEV et al., 2007](#)). O buraco negro supermassivo é a peça chave do motor central em AGNs. As principais propriedades dos AGNs podem ser caracterizadas em termos da massa de seu buraco negro supermassivo ( $M > 10^5 M_{\odot}$ ) juntamente com a taxa de acreção de massa. Um limite superior para a luminosidade de um AGN está diretamente relacionada com a massa do buraco negro, dada pela luminosidade de Eddington ( $L_{\text{Edd}}$ ) (ver Equação 1.1). Nesse contexto, a luminosidade de Eddington consiste na máxima luminosidade de corpo de massa  $M$  em acreção esférica.

$$L_{\text{Edd}} = 1,26 \times 10^{38} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ erg s}^{-1} \quad (1.1)$$

A observação direta do horizonte de eventos de um buraco negro, a região a partir da qual a velocidade de escape do potencial gravitacional supera a velocidade da luz, é um grande desafio, principalmente para galáxias distantes. Por exemplo, para um AGN típico no *redshift*  $z = 1$  exigiria uma resolução de  $\sim 10^{-9}$  segundo de arco para resolver espacialmente o horizonte de eventos do buraco negro. No entanto, para objetos próximos existe a possibilidade da construção da imagem ao redor do horizonte de eventos do buraco negro. Recentemente, no trabalho do [Akiyama et al. \(2019\)](#), foram apresentados os resultados do instrumento EHT (*Event Horizon Telescope*) obtidos com observações em 230 GHz e resolução angular instrumental de  $25 \mu\text{as}$ . Os autores produziram pela primeira vez a imagem do horizonte de eventos do buraco negro supermassivo da galáxia M87. Os resultados indicam um diâmetro de  $42 \pm 3 \mu\text{as}$ . A partir das simulações, os autores derivaram uma massa do SMBH

de  $6,5 \pm 0,7 \times 10^9 M_{\odot}$ .

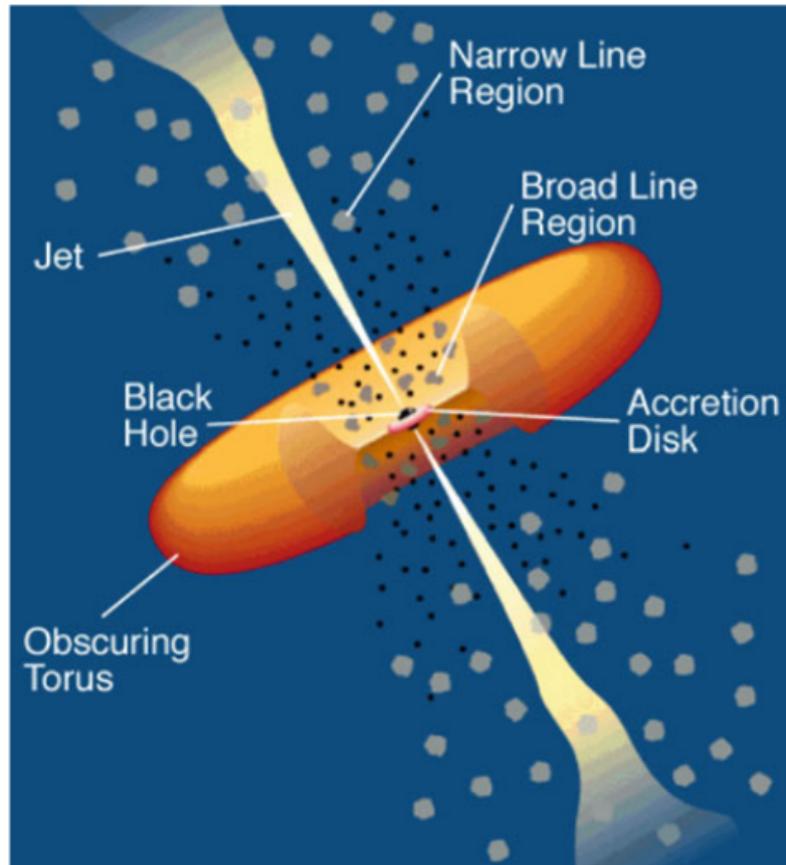
Ainda não existe um consenso na comunidade científica sobre a origem dos buracos negros supermassivos nas galáxias. Uma hipótese é a fusão de buracos negros estelares de massa elevada. Outra possibilidade é que buracos negros sementes, de massa  $\sim 10^2 M_{\odot}$ , passam por um período de crescimento exponencial, aumentando sua massa em várias ordens de grandeza em curtos intervalos de tempo. Isto teria acontecido na época em que as próprias galáxias estavam se formando, dentro do primeiro bilhão de anos de idade do Universo.

## 1.6 Modelo unificado

Até a década 80, a comunidade astronômica considerava objetos de tipo I e II como sendo de natureza diferente. Contudo, alguns autores suspeitavam de um mecanismo físico comum, apesar das diferenças espectroscópicas observadas em ambos os tipos de objetos. Foram [Antonucci e Miller \(1985\)](#) que pavimentaram o caminho para a unificação destes dois tipos de objetos. A detecção, em luz polarizada, de uma BLR oculta na galáxia protótipo de tipo II NGC 1068 confirmou a suspeita inicial de uma fonte central comum nos dois tipos de AGNs, e permitiu o desenvolvimento do modelo unificado. A ideia básica é que AGNs tipo I e II são intrinsecamente a mesma classe de objetos, e suas diferenças são apenas devidas aos efeitos de orientação relativos a um meio obscurecedor ([ANTONUCCI, 1993](#); [OSTERBROCK, 1989](#); [PETERSON, 1997](#); [URRY; PADOVANI, 1995](#)). No contexto do modelo unificado, cada AGN conhecido possui a mesma estrutura comum: um buraco negro supermassivo rodeado por um disco de acreção. Externo ao disco de acreção existe ainda um toróide de gás e poeira. Na [Figura 1.3](#) pode-se ver uma representação simplificada do modelo unificado. Quando o AGN é observado fora do plano do toróide, fonte central e disco de acreção, tem-se o caso onde a região de linhas largas é visível e, portanto, observa-se um AGN de tipo I. Quando observado no plano do toróide, a fonte central é oculta da visão direta, observando-se apenas as linhas estreitas produzidas fora deste. Neste caso, vemos um AGN de tipo II.

Até o início do ano 2000, grande parte das pesquisas em AGNs dirigia seus esforços na procura por evidências observacionais do modelo unificado e na determinação da massa do buraco negro central supermassivo. A descoberta da existência do buraco negro central tem um impacto profundo no crescimento da galáxia hospedeira ([FERRESE; MERRITT, 2000](#); [GEBHARDT et al., 2000](#)) abriu um novo paradigma na área de atividade nuclear. Uma descrição completa de como, por que e quando os buracos negros alteram os caminhos evolutivos de suas galáxias hospedeiras permanece como

Figura 1.3 - Representação esquemática da estrutura de um AGN de acordo com o modelo unificado.



Fonte: Urry e Padovani (1995).

uma das questões em aberto mais relevantes na astrofísica.

### 1.7 Relação entre massa do bojo, massa do buraco negro e dispersão de velocidade estelar

Estudos sobre uma possível relação entre a massa do bojo ( $M_{bojo}$ ) e a massa do buraco negro central ( $M_{BH}$ ) em galáxias começaram a ser realizados por volta dos anos 90. Kormendy e Richstone (1995) encontraram uma relação linear entre  $M_{BH}$  e  $M_{bojo}$  ao estudar uma amostra de oito galáxias. Resultados similares foram apresentados por Magorrian et al. (1998) através de uma relação entre massa do bojo e massa do buraco negro,  $M_{bojo} / M_{BH}$ , na forma de uma lei de potência. Os primeiros trabalhos mostrando uma correlação entre a luminosidade de uma galáxia e a massa do seu buraco negro surgiram com Magorrian et al. (1998). No ano 2000 dois trabalhos independentes encontraram uma correlação entre  $M_{BH}$  e a dispersão de velocidades

estelar,  $\sigma_*$  (FERRARESE; MERRITT, 2000; GEBHARDT et al., 2000). Esses resultados deixaram as pesquisas sobre buracos negros mais abrangentes, sendo possível desde então fazer estimativas das massas de buracos negros de galáxias mais distantes e sugerindo a existência de uma coevolução entre o buraco negro central e a galáxia hospedeira.

As primeiras correlações foram obtidas na forma de uma lei de potência  $M_{\text{BH}} \propto \sigma_*^\alpha$ , onde os valores de  $\alpha$  variaram de 3,5 a 6,0 de acordo com a revisão de Graham (2016). Resultados mais precisos sobre a relação entre  $M_{\text{BH}}$  e  $\sigma_*$  foram encontrados por Gültekin et al. (2009) utilizando uma amostra de 49 galáxias. Eles encontraram uma lei de potência da forma  $M_{\text{BH}} \propto \sigma_*^{(4,24 \pm 0,41)}$ .

Um exemplo de correlação entre  $M_{\text{BH}}$  - luminosidade do bojo ( $L_{\text{bojo}}$ ) e  $M_{\text{BH}} - \sigma_*$  pode ser visto na Figura 1.4. Os resultados foram obtidos através do estudo de 88 galáxias, sendo 46 elípticas, 20 com bojos clássicos e 22 com pseudo-bojos. Na análise realizada por Kormendy e Ho (2013), foi encontrada uma correlação empírica para  $M_{\text{BH}} - L_{\text{bojo}}$  (Equação 1.2) e  $M_{\text{BH}} - \sigma_*$  (Equação 1.3).

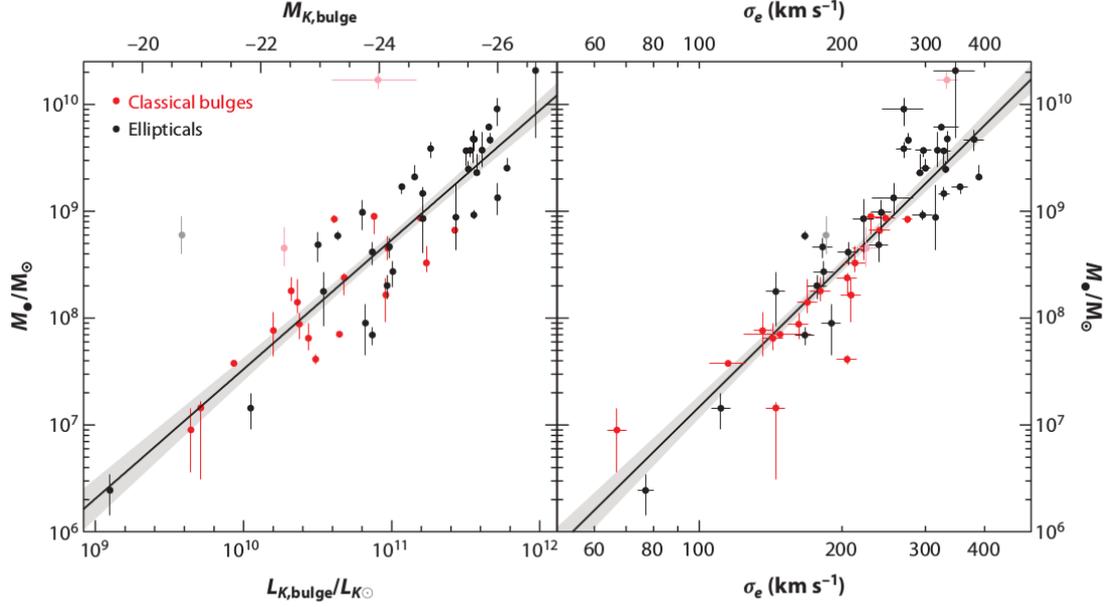
$$\frac{M_{\text{BH}}}{10^9 M_\odot} = (0, 542_{-0,061}^{+0,069}) \left( \frac{L_{\text{K,bojo}}}{10^{11} L_{\text{K}\odot}} \right)^{1,21 \pm 0,09} \quad (1.2)$$

$$\frac{M_{\text{BH}}}{10^9 M_\odot} = (0, 309_{-0,033}^{+0,037}) \left( \frac{\sigma_*}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{4,38 \pm 0,29} \quad (1.3)$$

É importante destacar que antes dos anos 2000, o cálculo de  $M_{\text{BH}}$  era realizado a partir da cinemática das estrelas e do gás em torno do buraco negro (para galáxias normais) e pelo mapeamento por reverberação (para núcleos ativos). No primeiro método existe a necessidade de resolver angularmente a região central das galáxias ( $\sim 10$  pc mais internos). Já no segundo é necessário monitorar as variações de brilho do contínuo e das linhas em emissão produzidas na BLR durante um período de tempo significativo (anos). Isso demanda enorme tempo de telescópio e a participação de grandes equipes de astrônomos. Maiores detalhes podem ser vistos em Peterson (2014). Dessa forma, com o uso da relação  $M_{\text{BH}} - \sigma_*$  foi possível estimar a  $M_{\text{BH}}$  em objetos mais distantes e em amostras maiores.

As relações entre as massas  $M_{\text{bojo}}$  e  $M_{\text{BH}}$  não são muito simples de serem interpretadas, mas apontam para um vínculo direto entre a massa do SMBH e sua galáxia hospedeira. Como o crescimento cosmológico de SMBH é principalmente devido ao

Figura 1.4 - Correlação entre  $M_{BH} - L_{bol}$  e  $M_{BH} - \sigma_*$ .



Fonte: Adaptada de Kormendy e Ho (2013).

acréscimo de matéria durante as fases ativas, e a energia liberada no processo de acréscimo pode ser maior do que a energia de ligação total de uma galáxia massiva, os AGN podem, em princípio, ter um profundo efeito na formação de galáxias e seus processos de evolução.

Simulações de computador que modelam a formação e evolução cosmológica de galáxias (HABOUZIT et al., 2019) têm realizado um progresso considerável na nossa compreensão do processo de coevolução SMBH/galáxia hospedeira. Os resultados mostram que os detalhes do desenvolvimento da galáxia estão intimamente ligados às propriedades das galáxias, tais como seus tamanhos e taxas de formação de estrelas. Essas propriedades são, por sua vez, reguladas pelo conteúdo de gás das galáxias, os movimentos do gás (principalmente o momento angular) e alguns mecanismos ainda incertos que regulam a formação de estrelas, como o *feedback* do buraco negro central.

Hoje em dia, sabemos que buracos negros em acreção podem emitir jatos ou ventos poderosos que revertem a acumulação de gás na região interna e levam o material

para fora, às vezes extinguindo a formação de estrelas. O estudo detalhado dessas e outras linhas de evidência ajudam a esclarecer os mecanismos de coevolução entre buracos negros e galáxias e revelar a evolução conjunta da galáxia e das populações de buracos negros supermassivos.

### 1.8 Efeitos de *feedback* em AGNs

Efeitos de *feedback* acontecem quando a energia emitida pelo AGN (escalas de parsecs) se acopla eficientemente à matéria (STORCHI-BERGMANN, 2014a), influenciando o meio interestelar (em escalas de centenas até milhares de parsecs) da galáxia hospedeira. Essa interação pode afetar de diversas formas a evolução galáctica: aquecendo o meio e removendo o gás destinado à formação estelar (“*feedback* negativo”) ou transportando e comprimindo o gás, aumentando a formação de estrelas (“*feedback* positivo”) (GASPARI et al., 2012; MAIOLINO et al., 2017).

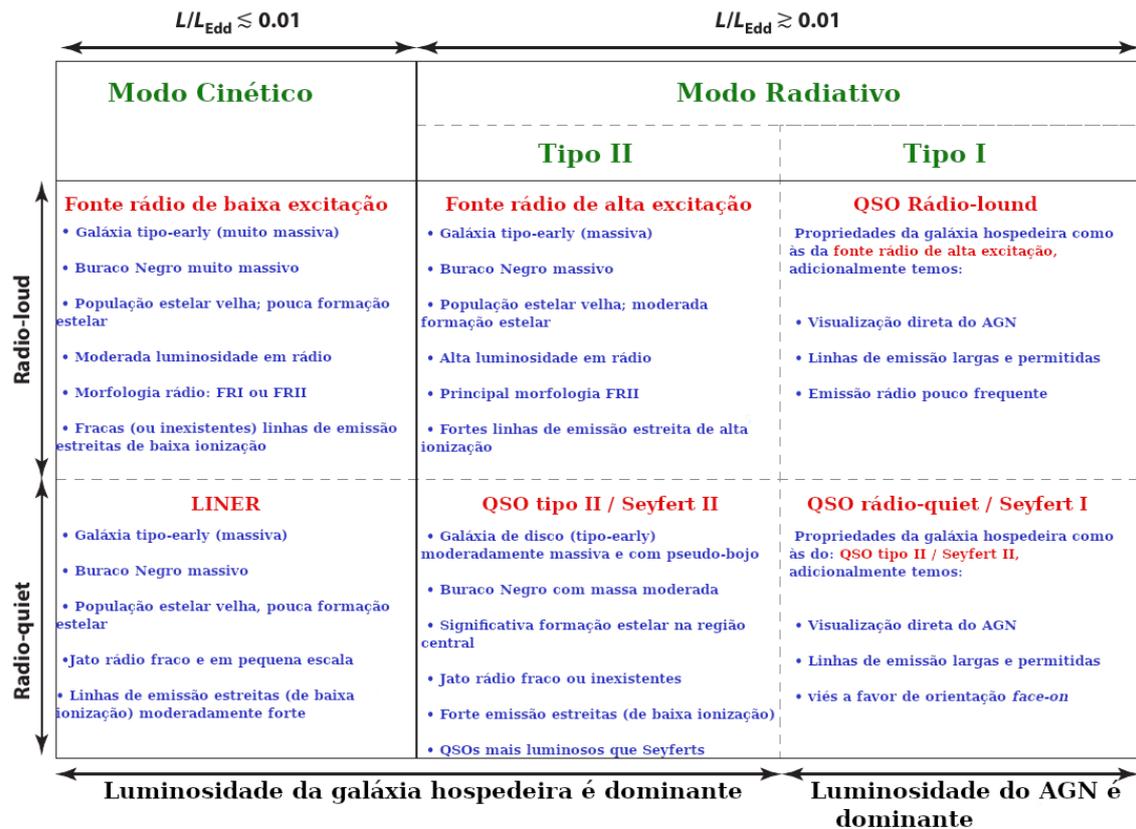
Existem dois modos de *feedback* em núcleos ativos: o modo radiativo e o modo cinético (HECKMAN; BEST, 2014). O primeiro manifesta-se na forma de processos radiativos ou ventos resultantes da acreção de matéria em um disco de acreção opticamente espesso (*feedback* radiativo). A alta eficiência de acreção ( $L_{\text{AGN}} / L_{\text{Edd}} \sim 1$ ) favorece esse mecanismo. É observado principalmente em quasares jovens a altos *redshifts* (COMBES, 2015). O segundo modo utiliza a energia mecânica de jatos rádio-emissores, quando a luminosidade do AGN é baixa ( $L_{\text{AGN}} / L_{\text{Edd}} \leq 0,01$ ). É comum em galáxias elípticas massivas. Este modo é bem documentado através de observações em raios-X nas galáxias centrais de aglomerados com núcleo frio, na forma de bolhas no meio quente circundante. O fluxo de energia, que é aproximadamente contínuo, aquece o gás intra-aglomerado quente e reduz o resfriamento radiativo e a subsequente formação de estrelas em uma ordem de magnitude.

No caso de fontes rádio-silenciosas de baixa luminosidade ( $L_{\text{Bol}} < 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ ), que são os AGNs mais numerosos no Universo local, não é claro qual é o modo de *feedback* dominante. Resultados recentes derivados a partir de observações com óptica adaptativa no infravermelho próximo (RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2017; MAY et al., 2018) e em rádio (JARVIS et al., 2019) indicam que o impacto do *feedback* cinético no ISM pode estar sendo fortemente subestimado. Estudos realizados em AGNs com jatos de baixa potência ( $\leq 6 \times 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$ ) mostram que estes podem impactar consideravelmente seu meio gasoso circundante (SRIDHAR et al., 2020). Isso acontece porque fontes de baixa luminosidade tendem a ter jatos de baixa velocidade. Como resultado, seus jatos são caracterizados por um componente maior de turbulência em comparação com jatos em radiogaláxias mais luminosas. Portanto, este

canal cinético pode ser mais relevante para a evolução da galáxia do que se pensava anteriormente (WYLEZALEK; MORGANTI, 2018).

Um resumo sobre os modos radiativo e cinético é apresentado na Figura 1.8. As abreviações FR1 / FR2 representam respectivamente galáxias Fanaroff-Riley do tipo I e tipo II (FANAROFF; RILEY, 1974).

Figura 1.5 - Categorização da população de AGNs.



O texto em azul descreve as propriedades típicas de cada classe de AGN.

Fonte: Adaptada de Heckman e Best (2014).

No trabalho de Matteo et al. (2005), ao fazer simulações da evolução de quasares, foi mostrado que os *outflows* presentes nos objetos são autoconsistentes com a relação  $M_{\text{BH}}$  e  $\sigma_*$ . A eficiência do *feedback* ( $\sim 5\%$ ) é inversamente proporcional à massa do buraco negro central, onde os modelos resultam em um tempo de vida para os quasares de 100 milhões de anos. Dessa forma, estima-se que *outflows* com energia cinética que ultrapasse 5% da luminosidade bolométrica do AGN serão capazes de aquecer o gás da galáxia hospedeira e até mesmo ejetando o gás e com isto

interrompendo ou evitando a formação estelar (HARRISON et al., 2018).

Existem ainda os processos de alimentação ou *feeding* no buraco negro central, que embora não sejam o foco desta seção, merecem ser brevemente mencionados. Esses processos promovem o crescimento do SMBH, estando assim diretamente relacionados com a galáxia hospedeira. As taxas de *inflow* estimadas de 0,01 a algumas  $M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ , chegam a ser, em alguns casos, até mil vezes mais altas do que a taxa de acréscimo de massa no buraco negro supermassivo. Como resultado, reservas de gás de  $10^6 - 10^9 M_{\odot}$  podem se acumular em  $10^{7-8}$  anos, o que pode levar à formação de novas estrelas e/ou serem ejetados através do início do *feedback* no AGN (STORCHI-BERGMANN; SCHNORR-MÜLLER, 2019). Sabe-se que os processos de *feeding* podem se iniciar nas regiões mais externas ( $\sim \text{kpc}$ ) das galáxias hospedeiras de AGNs. No entanto não há uma explicação física clara de como ocorre o transporte de gás das escalas de kiloparsecs até a escala de algumas dezenas de parsecs (GOODMAN, 2003).

### 1.9 Processos de *outflows* em AGNs

*Outflows* em diversas escalas galácticas são provavelmente a evidência observacional mais comum de *feedback* produzido pelo AGN. Estes podem ser caracterizados por ventos que expulsam parte do gás ao redor do disco de acreção (STORCHI-BERGMANN, 2009). Os ventos podem ser formados por interação radiativa ou por interação cinemática e podem interagir com diferentes regiões da galáxia, iniciando na BLR, transportando energia e matéria até a região de linhas estreitas e o disco da galáxia, podendo chegar até as regiões mais externas, apresentando diferentes fases (WADA et al., 2018). *Outflows* na fase ionizada ocorrem nas primeiras centenas de parsecs em torno do disco de acreção (STORCHI-BERGMANN, 2015; RIFFEL et al., 2020). Nela, o gás é fotoionizado pela fonte central e choques são produzidos pelo gás em expansão. Como resultado são observadas componentes largas e assimétricas nas linhas em emissão produzidas pelo gás que está sendo escoado.

Tradicionalmente, a identificação de *outflows* ionizados é realizada através da linha de [O III]  $\lambda 5007$  (GREENE et al., 2011). No entanto, esta linha também pode ser originada por uma componente de starburst, no disco da galáxia e da parte da NLR que não participa do escoamento (RODRÍGUEZ-ARDILA; FONSECA-FARIA, 2020). Isolar as diferentes contribuições no perfil da linha é complicado e às vezes sujeito a grandes incertezas devido à falta de suficiente resolução espectral <sup>1</sup> e angular nos espec-

---

<sup>1</sup>Denomina-se como resolução espectral,  $R = \lambda/\Delta\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $\Delta\lambda$  o intervalo entre dois *bins* consecutivos de comprimento de onda

tros. A esse respeito, [Rodríguez-Ardila et al. \(2006\)](#) mostraram que linhas coronais (CLs, do inglês *Coronal Lines*) tais como [Fe VII]  $\lambda 6087$  no óptico ou [Si VI]  $1,963 \mu\text{m}$  no infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near-Infrared*) são excelentes traçadores da componente ionizada do gás emissor. A energia necessária para sua produção ( $\chi > 100 \text{ eV}$ , onde  $\chi$  é o potencial de ionização necessário para produzir o íon) exclui a origem estelar. Conforme mostrado por [Ferguson et al. \(1997\)](#), quando a fonte de fotoionização é um AGN de baixa luminosidade ( $L_{\text{bol}} < 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ ), a emissão coronal não pode se estender a distâncias maiores do que algumas dezenas de parsecs da fonte central. Assim, sua detecção fora da região circunuclear é uma assinatura de escoamentos de gás associados a ventos ou choques devido ao jato rádio-emissor. Esses mecanismos são capazes de ionizar gás a grandes distâncias e possivelmente empurrar para fora o gás ionizado.

Na região externa, em escalas de quiloparsecs, os *outflows* podem ser detectados pela excitação de gás molecular. Esses tipos de *outflows* são basicamente predominantes na região do disco da galáxia, e para detecção das linhas emitidas são necessários estudos na região milimétrica do espectro. Os objetos NGC 1068 e NGC 1433 são exemplos de AGNs com clara detecção de *outflows* moleculares ([GARCÍA-BURILLO et al., 2014](#); [COMBES et al., 2013](#)).

Para regiões ainda mais distantes da galáxia, em escalas de dezenas de quiloparsecs, os *outflows* são detectados através do hidrogênio neutro. As detecções desses *outflows* são realizadas em instrumentos sensíveis em rádio, por exemplo, no comprimento de onda da linha de 21 cm. O objeto 3C 236, que é uma radiogaláxia de baixa excitação e apresenta um exemplo de *outflow* na fase de hidrogênio neutro com uma taxa de  $4,7 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  ([SCHULZ et al., 2018](#)).

A detecção simultânea de *outflows* nas três fases acima descritas em um mesmo objeto é rara na literatura. A galáxia Seyfert 2 IC 5063 é um dos melhores exemplos da natureza multifásica de escoamentos produzidos pelo AGN ([DASYRA et al., 2015](#); [DASYRA et al., 2016](#)). Tanto o AGN central quanto o jato rádio-emissor impulsionam energeticamente o gás para fora da galáxia. Contudo, as evidências sugerem que o jato é o principal motor dos *outflows* observados. Este é um resultado importante porque IC 5063, embora uma das galáxias Seyfert mais luminosas, é uma fonte de rádio relativamente fraca ( $P_{1,4 \text{ GHz}} = 3 \times 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$ ). Todas as características observadas podem ser descritas por um cenário de um jato se expandindo em um meio inhomogêneo, interagindo diretamente com as nuvens e inflando um casulo que conduz a escoamentos de gás na direção lateral para o meio interestelar. Este modelo é

consistente com resultados obtidos por simulações numéricas.

### 1.10 A utilização de dados IFUs nos estudos de *feeding* e *feedback* em AGNs

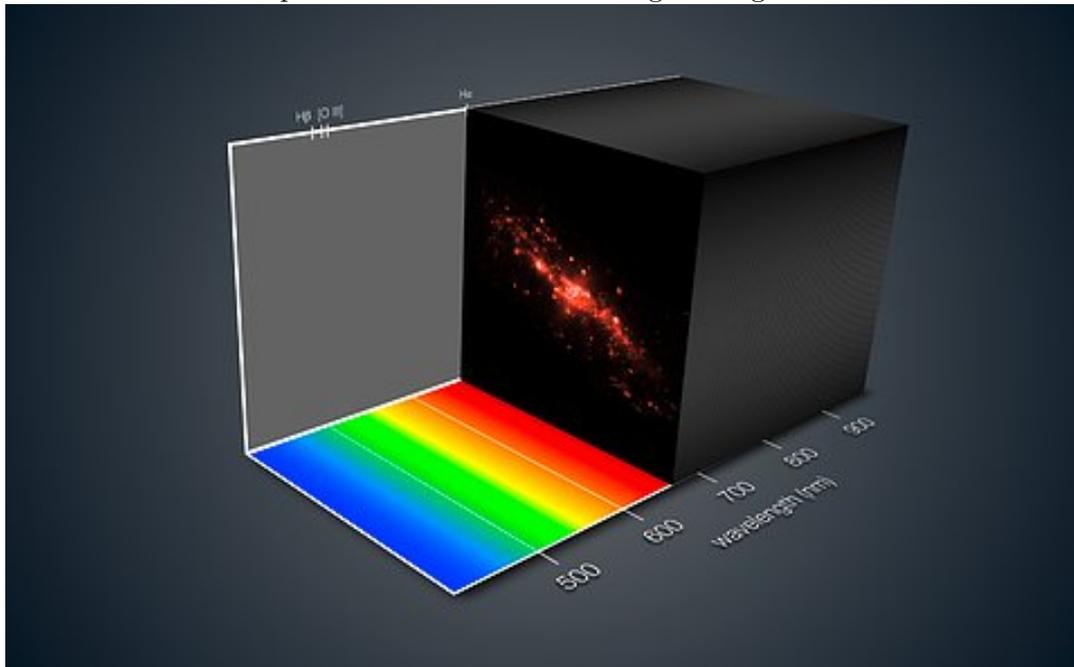
Com a chegada da técnica de IFS (*Integral Field Spectrography*), foi possível fazer imageamento e espectroscopia simultaneamente com um mesmo instrumento. Quando nos referimos aos dados IFUs (*integral field unit*), estamos nos referindo às unidades que compõem o IFS. Em observações IFUs é possível observar objetos estendidos com muito mais detalhes. Isso porque o campo pode ser dividido em elementos de resolução espacial, chamados de *spaxels*, e a combinação desses elementos em uma matriz que projeta o tamanho do detector formam a imagem do campo total.

Nas IFS, para cada spaxel projetado no céu existe um espectro associado, formando assim um cubo de dados onde as coordenadas XY referem-se às coordenadas espaciais e o eixo Z ao eixo de dispersão em comprimento de onda. Na Figura 1.6 apresenta-se uma representação artística da imagem da Galáxia NGC 4605 observada usando a técnica IFS. Nos eixos X e Y encontram-se as coordenadas espaciais (AR e DEC). Adicionalmente, é mostrado um terceiro eixo onde se situa o espectro com intervalos de comprimento de onda do visível até o infravermelho próximo (para maiores detalhes sobre a estrutura de dados IFUs ver o Capítulo 2). Embora observações com fenda longa apresentem dados de extrema qualidade (STORCHI-BERGMANN et al., 1999; RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 1998; RIFFEL et al., 2019), elas necessitavam de diversas observações e com tempos onerosos para conseguir mapear uma determinada área do céu. Por outro lado, instrumentos IFUs fazem isso de modo bem mais otimizado (DORS et al., 2012; RIFFEL et al., 2017; RIFFEL et al., 2018; MAY et al., 2018; MINGOZZI et al., 2019). Ainda, para cada posição no eixo de dispersão (comprimento de onda) tem-se a imagem do objeto em questão, uma vantagem adicional sobre a espectroscopia de fenda longa.

A utilização de dados IFUs para observação de *outflows* e *inflows* datam de mais de uma década atrás. Os primeiros trabalhos que utilizaram as unidades GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*) e NIFS (*Near-Infrared Integral Field Spectrograph*) em AGNs próximos (FATHI et al., 2006; RIFFEL et al., 2008; STORCHI-BERGMANN, 2009) davam suporte à teoria que o gás da NLR se origina do arraste do meio interestelar produzido por um jato-rádio ou vento do disco de acreção.

Os dados IFUs têm sido utilizados também para estudos do gás ionizado (H II) e gás molecular (H<sub>2</sub>) em AGNs próximos. No trabalho de Schönell et al. (2019), os

Figura 1.6 - Ilustração de um cubo de dados do instrumento MUSE, com seu respectivo intervalo espectral estudados e uma imagem da galáxia NGC 4605A.



Fonte: Adaptada de ESO (2021).

autores utilizaram 6 galáxias próximas para observar que o gás de H II e H<sub>2</sub> possuíam cinemáticas diferentes. Enquanto o gás molecular traça a rotação no plano da galáxia (com dispersão de velocidade,  $\sigma$ ), o gás ionizado está espacialmente localizado em torno do núcleo, mostrando assinaturas de *outflows*. Essas assinaturas podem ser mais claramente vistas usando a linha de emissão de [Fe II], enquanto o gás molecular indica *inflows* no plano da galáxia (STORCHI-BERGMANN, 2014b).

Para uma análise mais detalhada desses processos, são necessários instrumentos que possam resolver tanto a região central das galáxias quanto as regiões mais externas, em escalas de quiloparsecs. Por exemplo, no trabalho de Shimizu et al. (2019), os autores estudaram a galáxia NGC 5728 utilizando dados do HST (*Hubble Space Telescope*) e de cubos IFUs (MUSE, SINFONI e ALMA). Esses instrumentos permitiram analisar a distribuição da cinemática estelar, do gás ionizado e gás molecular. Utilizando medidas em escalas espaciais de 10 pc a 10 kpc, os autores apresentam com detalhes a cinemática do anel de formação estelar com uma taxa de *inflow* de  $1 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  e um *outflow* de gás ionizado com taxa de  $0,08 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ .

### 1.10.1 Levantamentos utilizando IFUs

Grande parte do conhecimento adquirido sobre os processos de *feeding/feedback* tem sido derivado do estudo de objetos individuais ou amostras de AGN próximos compostas de alguns poucos objetos. Contudo, nos últimos anos, levantamentos utilizando IFUs em amostras de médio a grande porte têm ganhado cada vez mais importância. Os resultados têm revelado detalhes, com uma estatística mais robusta, sobre as condições físicas de galáxias e os processos de alimentação da fonte central e retroalimentação do AGN.

Por exemplo, o *survey* CALIFA (*Calar Alto Legacy Integral Field Area*) (SÁNCHEZ et al., 2012) fornece dados IFS para mais de 600 galáxias no Universo próximo ( $0,005 < z < 0,03$ ). Um dos objetivos é estudar o meio interestelar (ISM, do inglês *Interstellar Medium*) da amostra para colocar vínculos chave sobre a importância do fenômeno AGN, a formação de estrelas, os choques e as estrelas velhas como fontes de ionização.

O *survey* MAGNUM (*Measuring Active Galactic Nuclei Under MUSE Microscope*) (CRESCI et al., 2015) utiliza dados do instrumento MUSE (maiores detalhes na Seção 2.2) para estudar as condições físicas da NLR, a relação entre a atividade nuclear e a formação de estrelas e os mecanismos de *outflows*. O *survey* CARS (*Close AGN Reference Survey*) (HUSEMANN et al., 2019) possui, como objetivo, mapear uma amostra de 39 AGNs tipo I próximos com intervalo de *redshift* de 0,01 a 0,06, em todos os comprimentos de onda, desde rádio até raios-X. Para essa análise o programa utiliza-se de diversos IFUs tais como VLT/MUSE e Gemini-N/NIFS no óptico/NIR. Dados em outros comprimentos de onda são obtidos através do Chandra/HRC, ALMA e VLA.

Por fim o levantamento NIFS-GEMINI tem como objetivo estudar em detalhe as centenas de parsecs internos de galáxias ativas com o intuito de colocar vínculos importantes nos processos de alimentação e *feedback* de AGNs usando observações com óptica adaptativa usando o levantamento NIFS nas bandas J e K (RIFFEL et al., 2017).

Apesar de todo o avanço no conhecimento adquirido nos últimos anos sobre os processos de alimentação e retroalimentação em AGNs, várias questões fundamentais continuam em aberto. A principal, é se as taxas de escoamentos de gás medidas em AGNs são suficientes para deter o processo de formação estelar. Parte do problema está na dificuldade de conectar as diferentes fases dos *outflows* detectados (ionizado,

molecular e neutro). O problema é agravado pelo fato de que a maior parte dos IFUs disponíveis possuem um campo de observação reduzido ( $< 5 \times 5 \text{ arcseg}^2$ ), permitindo mapear o gás ionizado em escalas de apenas umas poucas centenas de parsecs nos objetos próximos.

O próprio cálculo da taxa de *outflow* pode carregar grandes incertezas. Isso porque o valor da densidade do gás, quantidade necessária nessa determinação, é realizada de forma indireta: no NIR, onde boa parte dos trabalhos têm se concentrado, não dispõe de indicadores confiáveis dessa propriedade. Ainda, as linhas em emissão utilizadas no cálculo das taxas de *outflow* apresentam contribuição de vários processos físicos, e separá-las nas suas componentes individuais nem sempre é possível. É fundamental, portanto, encontrar indicadores não-ambíguos, menos sujeitos a contaminação por outros processos (i.e., *outflows* produzidos por regiões de formação estelar e/ou explosões de supernova), associados totalmente ao fenômeno AGN.

### 1.11 Objetivos do trabalho

Como já visto, o *feedback* de um AGN relaciona os *outflows*, sejam de origem cinemática ou radiativa, com a galáxia hospedeira. Na seção 1.7, foram apresentadas fortes evidências de relações entre a região nuclear de galáxias e suas respectivas galáxias hospedeiras. Dessa forma, existe no meio científico uma necessidade de descrever como e porque existe essa coevolução e qual o papel dela na evolução de galáxias. Estudos sobre o comportamento cinemático do gás nas regiões mais internas dos núcleos ativos, assim como a determinação da taxa de *outflow* na escala de quilo-parsec, se mostram importantes para obter informações mais precisas da influência dos *feedbacks* na evolução galáctica.

Para o estudo dos parâmetros físicos dos *outflows* é necessário determinar os fluxos de linhas de emissão na região de estudo. Porém, neste processo deve-se levar em conta a contaminação devida à componente estelar. Uma particularidade importante quanto a componente estelar é a limitação da energia dos fótons emitidos. Estrelas em geral não emitem fótons com energia maior que 50 eV. Em contraste, os núcleos ativos, que são fontes em raios-X, podem fotoionizar átomos com potencial de ionização maior de 45 eV. Como exemplo podemos citar a linha de alta ionização de [Fe VII]  $\lambda 6087$  ( $\chi = 99 \text{ eV}$ ). Dessa maneira, a utilização de linhas de alta ionização para a detecção de *outflows* ionizados pode ser uma alternativa em relação às linhas comumente utilizadas (i.e.,  $\text{H}\alpha$  e [O III]  $\lambda 5007$ ). Sabe-se que estudos sobre *outflows* são tradicionalmente realizados em objetos de alta luminosidade, tais como quasares e radiogaláxias. **No entanto, AGNs com luminosidade mode-**

rada e jatos de baixa potência têm sido pouco estudados (WYLEZALEK; MORGANTI, 2018), embora representem uma grande fração dos AGNs detectados em levantamentos. É fundamental investigar se em objetos de moderada e baixa luminosidade existem *outflows* significativos, capazes de expulsar o gás da região central e deter o processo de formação estelar!

Esse trabalho tem como objetivo principal procurar e caracterizar *outflows* de gás ionizado em uma amostra composta por AGNs de média luminosidade ( $L_{\text{bol}} \sim 10^{43} - 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ ) e com jatos-rádio de baixa potência ( $P < 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$ ). Com esse intuito, pela primeira vez na literatura serão utilizados dados IFUs e linhas coronais para estudar as regiões de *outflows* em AGNs. São também objetivos desse trabalho:

- Determinar os limites até onde se estende o gás de mais alta ionização, e como se relaciona esse gás com o cone de ionização das galáxias e o jato rádio-emissor.
- Derivar a cinemática do gás de alta ionização e comparar com o modelo de rotação do disco para estabelecer se o gás coronal pode efetivamente ser associado aos *outflows*.
- Caracterizar os perfis das linhas em emissão (velocidade, dispersão de velocidade), assim como a presença de múltiplas componentes, para estudar a turbulência do gás emissor de linhas de alta ionização.
- Utilizar o código de fotoionização SUMA para investigar a presença de choques, principalmente na região estendida de gás coronal.
- Determinar as propriedades físicas do gás nas regiões associadas ao gás coronal (extinção, densidade e temperatura).
- Derivar a taxa e massa do *outflow* assim como encontrar a energia mecânica associada ao jato, e qual sua influência nos *outflows* produzidos.

A seguir, apresentaremos no Capítulo 2 a amostra de galáxias selecionadas e quais as características do instrumento de origem dos dados. No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para análise dos dados. No Capítulo 4 é apresentado os resultados gerais para galáxia Circinus. Nos Capítulos 5 e 6 são apresentados os resultados para outras seis galáxias da amostra. Por fim, no Capítulo 7 são discutidos os resultados gerais desse trabalho.

## 2 DESCRIÇÃO DA AMOSTRA DE DADOS UTILIZADOS

A amostra de galáxias estudadas neste trabalho foi selecionada a partir do levantamento MAGNUM (CRESCI et al., 2015), atendendo adicionalmente aos critérios descritos abaixo:

- Ser uma galáxia Seyfert 2 com resultados prévios mostrando a presença de *outflows* ionizados, principalmente traçados pela linha de [O III]  $\lambda 5007$ .
- O objeto deve possuir linhas coronais no espectro nuclear. No mínimo, [Fe VII]  $\lambda 6087$  tem que ser claramente detectada.
- A galáxia deve estar localizada a uma distância menor que 75 Mpc ( $z < 0,02$ ). Dessa forma, pode-se observar a linha de [S III]  $\lambda 9069$  antes do corte em comprimento de onda na região vermelha do espectrógrafo (9300 Å).

No processo de seleção de objetos foi dada preferência a galáxias Seyfert 2. Esse critério deve-se principalmente ao fato de que esses objetos, de acordo com o modelo unificado, são observados em um ângulo de inclinação onde o toróide oculta da visão direta a fonte central. Assim, podemos claramente observar a NLR em detalhe, sem a diluição produzida pelo contínuo emitido pelo AGN, principalmente na região mais próxima ao núcleo. Ainda, a presença de componentes largas nas linhas permitidas, um contínuo de lei-de-potência e emissão de multipletos de Fe II no espectro central, como é observado em galáxias Seyfert 1, introduz uma maior complexidade no tratamento dos dados. Pelo exposto acima, neste estudo piloto nos limitamos a galáxias Seyfert 2.

O critério de o objeto possuir linhas coronais no espectro nuclear atende ao objetivo principal do trabalho, que é o de usar essa emissão como traçadora adicional de outflows de gás ionizado. Ainda, visamos a detecção de emissão coronal estendida. A nossa hipótese é que a observação de gás de alta ionização estendido, em escalas de centenas de parsecs ou mais, evidencia a influência do modo de *feedback* cinemático nos AGNs.

A escolha de alvos com  $z < 0,02$  nos permite realizar uma análise mais detalhada da NLR em escalas desde algumas dezenas de parsecs até quiloparsecs. Objetos mais distantes não seriam interessantes, uma vez que os dados do MUSE sem óptica adaptativa possuem uma resolução espacial limitada pelo *seeing* da noite ( $\sim 0,8''$ ).

Assim, a região não resolvida ocuparia um tamanho de algumas centenas de parsecs, limitando fortemente a observação de possíveis estruturas de gás de alta ionização.

Aplicando os critérios acima à amostra inicial de 10 AGNs do levantamento MAGNUM, foram selecionadas para a nossa análise Circinus, IC 5063, NGC 5643, NGC 3393, NGC 5728 e NGC 1068. Adicionalmente, incluímos a galáxia ESO 428-G014 por também possuir dados MUSE, atender aos critérios descritos acima e ter confirmação prévia de emissão coronal em escalas de centenas de parsecs (MAY et al., 2018). Os sete objetos selecionados são AGNs de tipo II clássicos, com estudos prévios relatando a presença de *outflows* de gás ionizado e/ou molecular, detectados em diversos comprimentos de onda, incluindo o rádio. Na Tabela 2.1 são apresentadas características básicas sobre a nossa amostra, tal como ascensão reta, declinação, velocidade radial, distância, escala de placa e redshift. Na seção 2.4 são descritos em mais detalhes as características relevantes de cada objeto e os resultados mais importantes encontrados na literatura.

Tabela 2.1 - Amostra final de objetos, juntamente com características básicas de cada alvo.

Objeto	AR (J2000)	AR (J2000)	V <sup>1</sup>	Dist. (Mpc) <sup>2</sup>	Escala <sup>3</sup>	z <sup>4</sup>
Circinus	14:13:09,95	-65:20:21,20	434	3,9	19	0,00145
IC 5063	20:52:02,34	-57:04:07,60	3402	49,3	239	0,01135
NGC 5643	14:32:40,74	-44:10:27,86	1199	15,8	76	0,004
NGC 3393	10:48:23,46	-25:09:43,40	3750	52,4	254	0,01251
NGC 5728	14:42:23,90	-17:15:11,09	2804	40,5	196	0,00935
ESO 428-14	07:16:31,21	-29:19:28,98	1698	22	107	0,00566
NGC 1068	02:42:40,71	-00:00:47,81	1137	16,9	82	0,00379

<sup>1</sup> Velocidade Radial da galáxia em  $\text{km s}^{-1}$ ; <sup>2</sup> Distância em Megaparsecs; <sup>3</sup> Escala em unidades de parsec por segundo de arco; <sup>4</sup> Redshift.

Fonte: NASA (2021).

## 2.1 Espectroscopia de campo integral

No Capítulo 1, abordamos a importância da utilização de dados IFUs para estudos de AGNs. Nesta Seção será realizada uma descrição mais técnica sobre esses dispositivos. Daremos ênfase ao instrumento MUSE, já que todos os dados utilizados no trabalho foram coletados usando essa unidade.

Existem 3 diferentes arquiteturas dos dispositivos IFUs: rede de microlentes (*Lenslet Array*), fatiamento de imagens (*Image-Slicer*) e conjunto de fibras (*fibre bundle*).

A seguir, será realizada uma breve descrição de cada um deles e os instrumentos expoentes de cada categoria.

### 2.1.1 Rede de microlentes

Neste tipo de IFU, a imagem de campo observado é dividida e projetada em uma matriz de microlentes (BACON et al., 1995). Cada microlente tem associada uma parte do campo, cuja luz é dispersada pelo espectrógrafo. As microlentes podem ser inclinadas para que os espectros não se sobreponham uns aos outros. Esta configuração tem a vantagem de poder extrair vários espectros de uma única imagem, porém com um intervalo de comprimento de onda reduzido, devido ao modo como são empilhados os espectros. No painel superior da Figura 2.1 é apresentada uma ilustração com esta configuração, onde pode-se ver a entrada da luz pelo telescópio e a forma como a imagem é colimada e empilhada no CCD. Exemplos de instrumentos IFUs que utilizam esses métodos são: TIGER (*Traitement Intégral des Galaxies par l'Étude de leurs Raies*) (BACON et al., 1995) e SAURON (*Spectroscopic Areal Unit for Research on Optical Nebulae*) (BACON et al., 2001). Na imagem superior da Figura 2.1 é apresentado um esquema do método de rede de microlentes.

### 2.1.2 Conjunto de fibras

Na técnica que utiliza o conjunto de fibras, uma parte da imagem é projetada e colimada em um grupo de fibras, onde os fótons percorrem a fibra até chegar no espectrógrafo e por fim no CCD. O método de conjunto de fibras pode estar ou não associado ao método de rede de microlentes. As principais vantagens desse método está na montagem do instrumento, uma vez que as fibras são flexíveis, sendo assim os espectros podem ser empilhados de maneira mais eficiente. No painel inferior esquerdo da Figura 2.1 é apresentado um esquema do método do conjunto de fibras associado ao método de rede de microlentes, onde pode-se perceber o feixe de fibras que permitem uma montagem do espectrógrafo mais distante do telescópio. Alguns instrumentos que utilizam esse método: SparsePak (BERSHADY et al., 2004), PPAK (KELZ et al., 2004), INTEGRAL (GARCÍA-LORENZO et al., 2000), MANGA (*Mapping Nearby Galaxies at APO*) (BUNDY et al., 2015) e GMOS (*GEMINI Multiple Object Spectrographs*) (DAVIES et al., 1997).

### 2.1.3 Fatiamento de imagens

No método do fatiamento de imagens, o campo observado pelo telescópio é dividido em fatias horizontais. A luz proveniente de cada fatia é direcionada para uma re-

gião ligeiramente diferente, onde um conjunto de espelhos reorganiza as fatias sendo então enviadas para o espectrógrafo. Uma das vantagens desta técnica é a possibilidade de produzir espectros de alta resolução, porém ao custo de um aumento da complexidade do sistema óptico. Alguns instrumentos que utilizam esse método de fatiamento de imagens são SINFONI (*SIN*gle *F*aint *O*bject *N*ear-*i*nfrared *I*nvestigation) (EISENHAUER et al., 2003), NIFS (*N*ear-*i*nfrared *I*ntegral *F*ield *S*pectrograph) (MCGREGOR et al., 2003) e MUSE (*M*ulti *U*nit *S*pectroscopic *E*xplorer) (BACON et al., 2010). Esse último instrumento se destaca principalmente pela grande cobertura em comprimento de onda (4700 – 9300 Å), a boa resolução espectral ( $\sim 2500$ ) e a capacidade de observar um campo de  $1' \times 1'$ .

## 2.2 Espectrógrafo MUSE

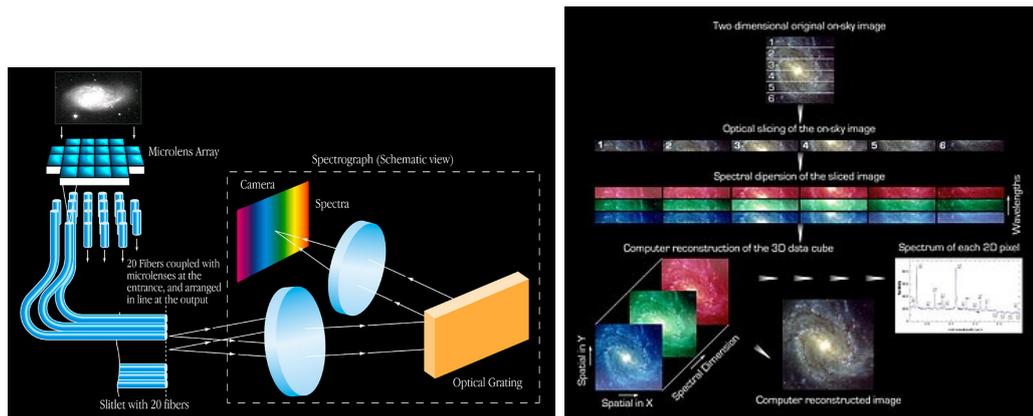
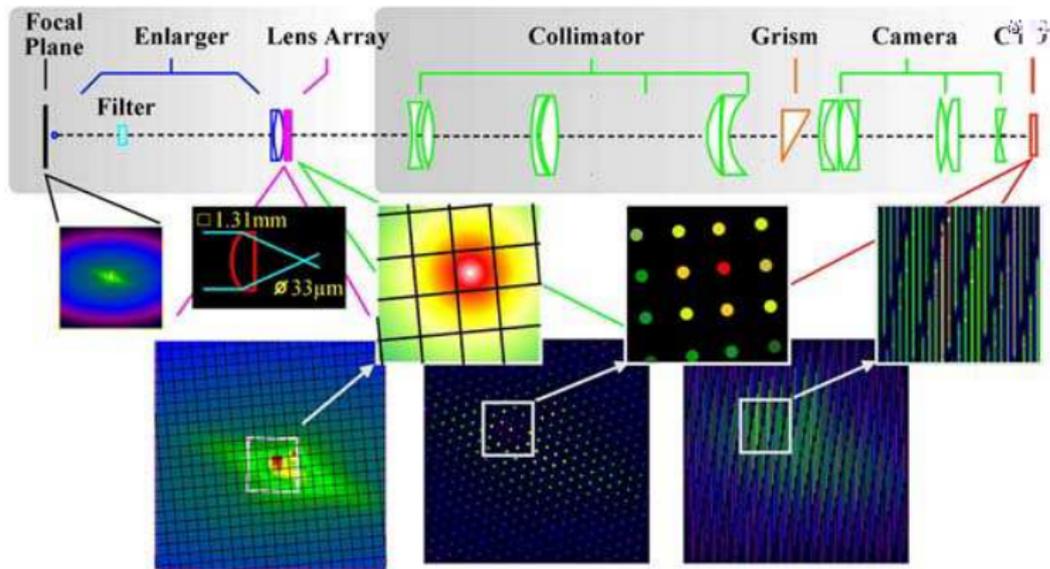
O MUSE é um instrumento de espectroscopia de campo integral IFS instalado no telescópio Yepun, o quarto telescópio do VLT (*Very Large Telescope*). O VLT compõe um conjunto de 4 telescópios de 8,2 metros de diâmetro localizado em Cerro Paranal, no deserto do Atacama, na região norte do Chile. Desde o ano de 2017, o MUSE conta com um módulo de óptica adaptativa (AO, do inglês *Adaptive optics*). Porém, os dados utilizados neste trabalho não possuem esse tipo de correção.

O MUSE possui um campo de visão de praticamente 1 minuto de arco quadrado e observa espectros na região do óptico. A resolução espectral é de 1770 em 4800 Å e de 3590 em 9300 Å. Cada spaxel amostra uma amostragem espacial de 0,2 segundos de arco. Desse modo, o campo do detector é amostrado por aproximadamente 90000 spaxels.

Para esse trabalho, utilizamos dados de arquivo já reduzidos disponíveis na página do ESO, na seção *Spectral Data Products Query Form*. De acordo com Venturi et al. (2021) as possíveis variações de softwares para redução dos dados não introduzem diferenças mensuráveis nos cubos finais. O *Pipeline* do MUSE utiliza a estratégia padrão de redução: correção de efeitos instrumentais, correção de efeitos atmosféricos e subtração do céu. Todos os objetos seguem a receita de redução do EsoRex (ESO Recipe Execution Tool) (ESO, 2015).

Os cubos finais dos objetos da nossa amostra possuem  $\sim 300 \times 300$  spaxels, resultando em um total de  $\sim 90000$  spaxels, onde cada spaxel cobre uma região de  $0,2'' \times 0,2''$ . Para a nossa amostra, o campo do MUSE cobre um campo de visão de  $1 \text{ kpc}^2$  até  $15 \text{ kpc}^2$ , dependendo da distância do objeto. Na Tabela 2.2 são apresentadas as informações sobre as observações dos objetos da nossa amostra, tais como

Figura 2.1 - Ilustração dos três métodos de arquitetura dos instrumentos de coleta de dados IFU.



No painel superior encontra-se a configuração óptica para o método de Microlentes. Nos dois painéis inferiores são apresentados: a ilustração para a configuração do conjunto de fibras (a esquerda) e do fatiador de imagens (a direita).  
 Fonte: Adaptada de Bacon et al. (2001) e ESO (2021).

tempo de exposição, data de observação, nome do arquivo e resolução angular.

Tabela 2.2 - Informações observacionais das galáxias estudadas.

Objeto	Arquivo ESO	Data <sup>1</sup>	Resolução <sup>2</sup>	T <sub>obs</sub> <sup>3</sup>	Pipeline <sup>4</sup>
Circinus	ADP.2016-06-14T18:02:17.657	11/03/2015	0,778"	1844 s	1.4
IC 5063	ADP.2016-07-22T15:57:54.788	23/06/2014	0,782"	2240 s	1.6.1
NGC 5643	ADP.2016-06-17T15:46:46.093	14/05/2015	0,558"	3288 s	1.4
NGC 3393	ADP.2017-03-21T11:15:10.512	31/01/2017	0,789"	3294 s	1.6.4
NGC 5728	ADP.2017-06-14T09:12:09.461	03/04/2016	0,690"	4747 s	1.6.4
ESO 428-14	ADP.2016-09-22T21:00:32.895	19/04/2016	1,123"	2744 s	1.6.1
NGC 1068	ADP.2016-06-17T08:44:56.817	01/12/2014	0,900"	735 s	1.4b1

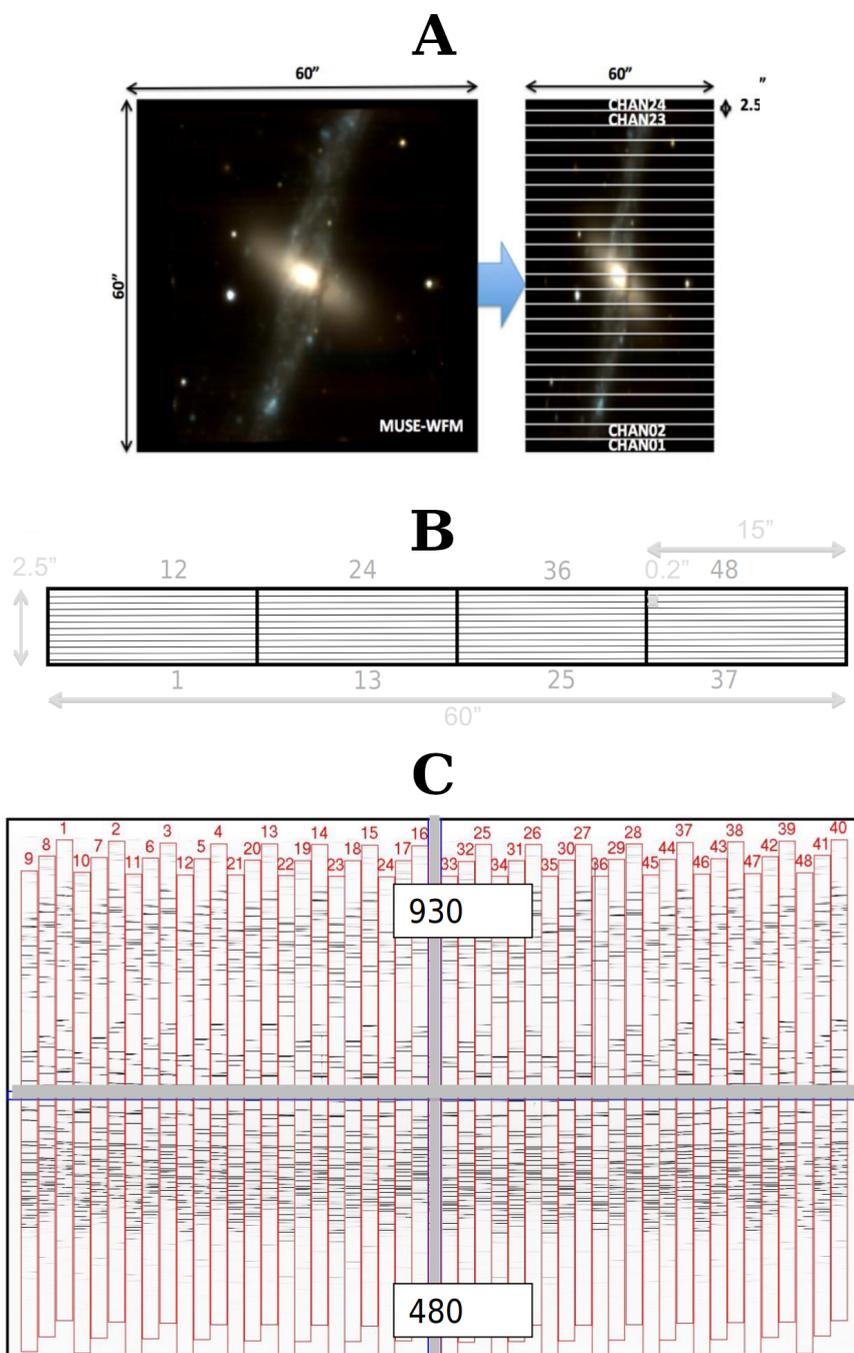
<sup>1</sup> Data de Observação; <sup>2</sup> Resolução angular do objeto; <sup>3</sup> Tempo de exposição da observação; <sup>4</sup> Versão do *Pipeline*.

### 2.3 Processos para redução dos dados do MUSE

Os procedimentos de coleta e redução de dados do MUSE é complexo e foge do escopo desse trabalho apresentá-los em detalhe. Contudo, serão descritas aqui as principais características da redução dos dados do MUSE. Detalhes adicionais podem ser encontrados em [Richard et al. \(2018\)](#).

No MUSE, o campo de observação é dividido em 24 fatias, cada uma projetando no céu uma área de  $60'' \times 2,5''$  (ver imagem A da Figura 2.3). Em uma fatia são arranjados 48 espectros do respectivo campo em um CCD de  $4224 \times 4240$  pixels, dividido em 4 quadrantes, cada um de  $2048 \times 2056$  pixels, além de uma região de overscan de 32 pixels de largura. Na Figura 2.3 (Imagem C) tem-se a ordem dos 48 espectros no detector. Logo acima, na imagem B temos o campo fatiado do MUSE dividido em 4 sub-fatias onde estão os espectros de 1 a 12 na primeira sub-fatia, de 13 a 24 na segunda fatia e assim sucessivamente. Os números que marcam a posição das fendas de cada sub-fatia são referentes aos números do espectro da Imagem A, logo abaixo. Cada espectro ocupa uma largura de 75 pixels e os comprimentos de onda mais azuis são localizados na parte inferior do detector e os comprimentos de onda mais vermelhos na parte superior.

Figura 2.2 - Configuração do IFU MUSE.



No painel A é apresentada a distribuição das 24 fatias feitas pelo instrumento. No painel B são indicadas as posições espaciais dos 48 espectros presentes em uma fatia. No painel C tem-se as ordens dos 48 espectros no CCD, onde cada espectro ocupa uma faixa de 75 pixels.

Fonte: Adaptada de Richard et al. (2018).

A primeira imagem IFU de uma fatia é nomeada como CHAN01, a segunda como CHAN02 e assim por diante até chegar na fatia CHAN24 (Ver Imagem A da Figura 2.3). São produzidos dois arquivos de cada IFU, o primeiro contém os dados principais da observação, chamado *data quality* e o segundo contém os dados dos erros, chamados *STAT*. Nessa etapa são retirados os pixels saturados e os espectros corrigidos de efeitos instrumentais tais como bias, dark e overscan. Os procedimentos subsequentes incluem a subtração do céu nos espectros, o alinhamento geométrico dos espectros no cubo, a calibração em comprimento de onda e de fluxo. A precisão desses dois últimos procedimentos é de  $1/20$  de um elemento de resolução e de  $\pm 20\%$ , respectivamente. Na Tabela 2.3 são descritos os principais passos para redução e calibração dos dados obtidos no modo padrão. Para isso foi utilizado como referência o manual do MUSE versão 8.12 (RICHARD et al., 2018).

Maiores detalhes sobre os procedimentos de redução dos dados podem ser encontrados em Weilbacher et al. (2020). No trabalho são descritos os algoritmos utilizados em todas as etapas de processamento para calibração dos dados científicos, explicando como os dados brutos são reduzidos e calibrados. Os autores verificam a qualidade dos dados de saída e quais procedimentos selecionados são os mais adequados para a análise científica.

É importante mencionar que os dados MUSE extraídos do arquivo do ESO, além das correções e calibrações descritas acima, estão também corrigidos por efeito de difração atmosférica diferencial. Este último passo é realizado durante o pós-processamento dos cubos de ciência (WEILBACHER et al., 2020) pela própria pipeline do instrumento e é fundamental, dada a grande cobertura espectral de cada cubo (4700 – 9300 Å).

Tabela 2.3 - Passos para redução padrão do MUSE.

Calibração	Número de exposições	Frequência	Período	Objetivo
Bias	11	Diariamente	dia	Produção do Master bias correção do bias
Dark	5 × 30 minutos	Mensalmente	dia	Produção do Master dark correção do dark
Flat-field com as lâmpadas	11	Diariamente	dia	Correções por iluminação
Comprimento de onda Ne, Xe, HgCd	5 por lâmpada	Diariamente	dia	Calibração em comprimento de onda
Calibração geométrica	80	Mensalmente	dia	Realinhamento das fatias
Flat-Field com céu	> 3	Semanalmente	crepúsculo	Correção por iluminação
Flat-Field	1 a 3	1 a cada 2 horas	noite	Corrigir flat-field devido as variações de temperatura
Aperfeiçoamento do Flat-field	N <sup>1</sup>	Quando pedido pelo observador	noite	Flat-field de Alta precisão
Aperfeiçoamento do comprimento de onda	N <sup>1</sup>	Quando pedido pelo observador	noite	Calibração em comprimento de onda com alta precisão
Calibração espectrofotométrica e correção telúrica	1	Noite fotométrica	noite	Calibração de fluxo absoluto
Astrometria	1	Mensalmente	noite	Calibração astrométrica

<sup>1</sup> O número de observações é configurado pelo usuário.

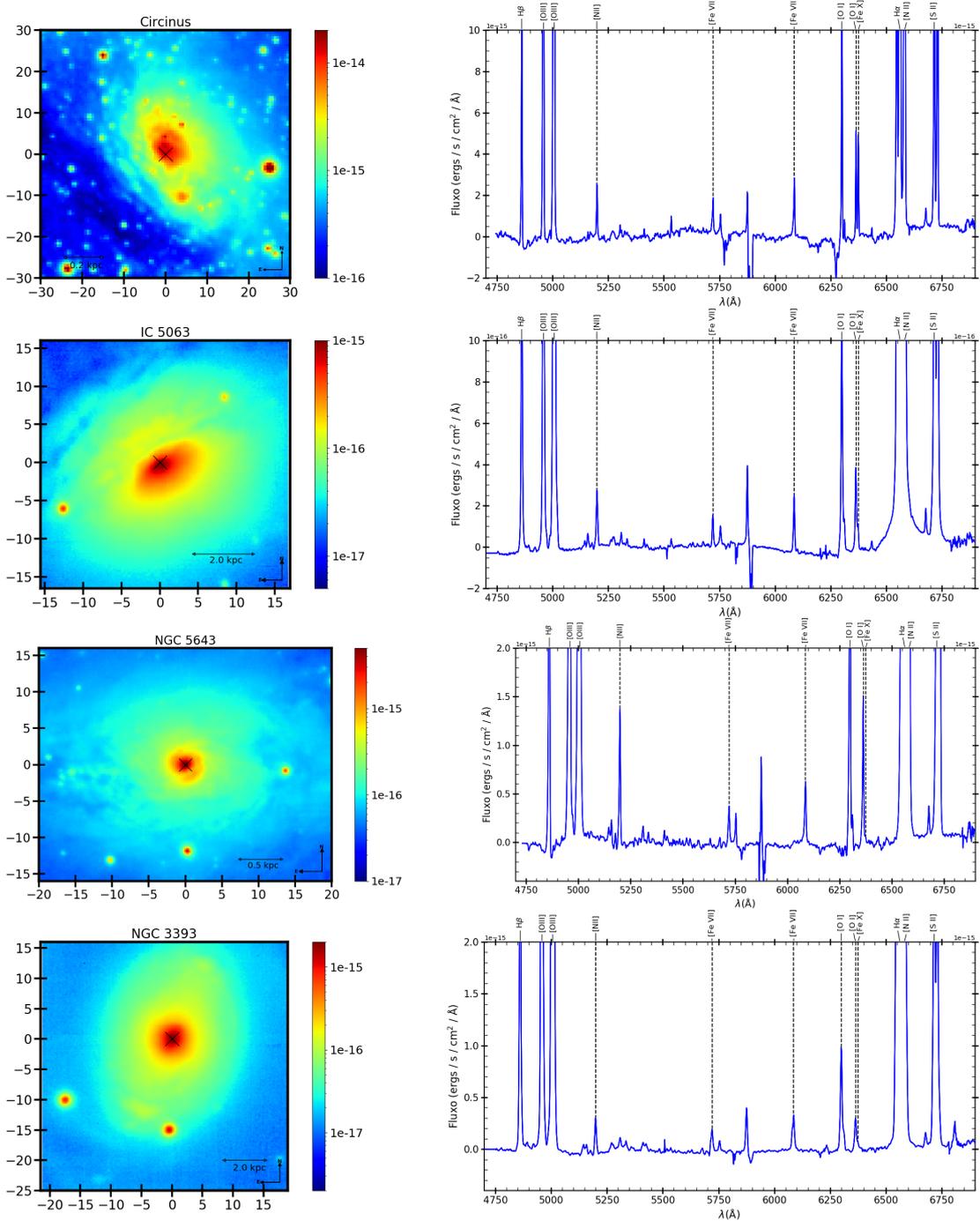
## 2.4 Descrição individual dos objetos da amostra

Apresentamos a seguir as principais características de cada galáxia da nossa amostra. Outras informações pertinentes dos objetos serão discutidas no Capítulo 5. Nas Figuras 2.3 e 2.4 são apresentados mapas de emissão contínua em uma janela de 100 Å centrada em 5500 Å (painéis da esquerda) junto com o espectro da região nuclear para cada galáxia (painéis da direita), integrados em um raio de 150 pc com centro no pico de emissão do contínuo.

### 2.4.1 Circinus

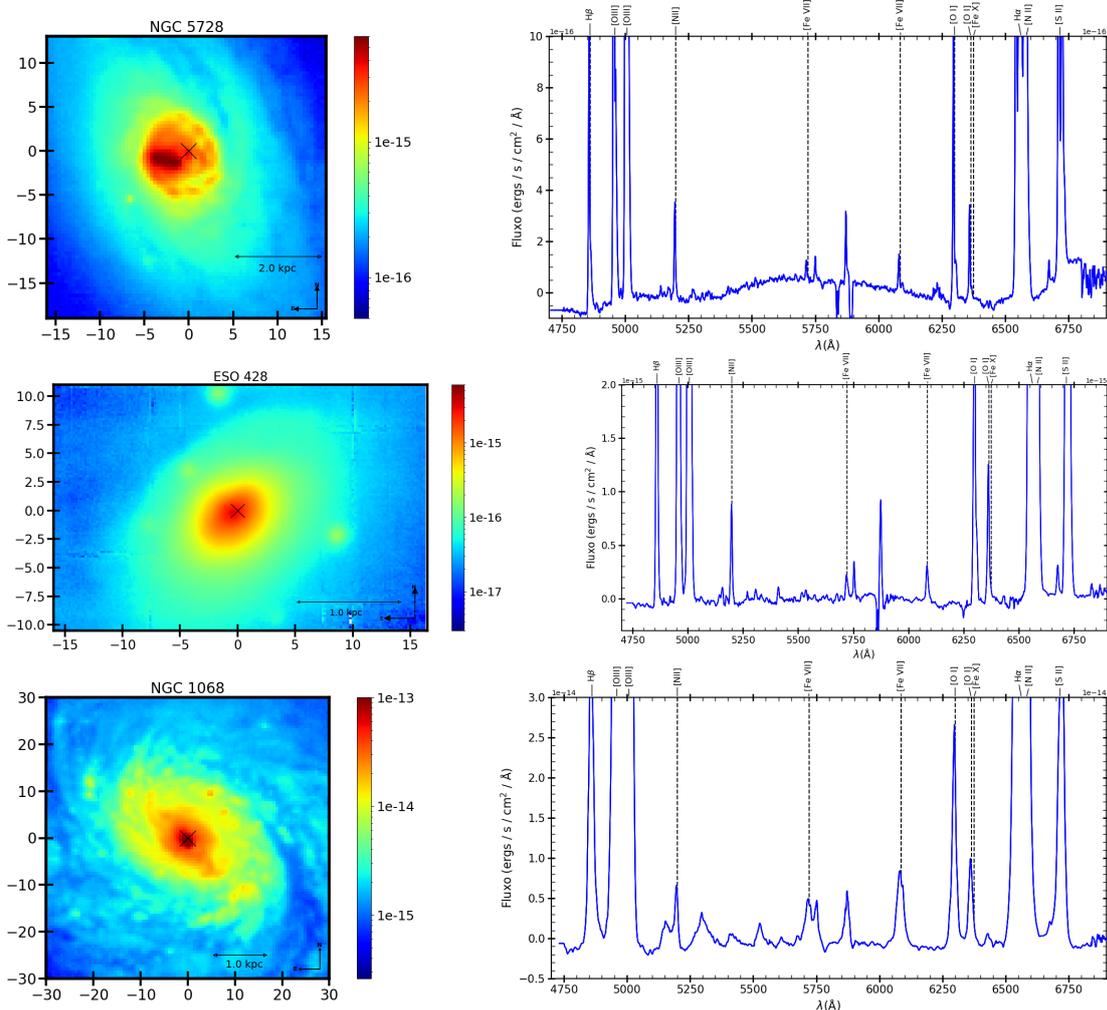
Circinus é a galáxia Seyfert 2 mais próxima da Terra. Possui uma morfologia espiral (SAB) e um ângulo de inclinação de aproximadamente 65°, pertencente ao grupo local com distância de  $4, 2 \pm 0, 8$  Mpc (FREEMAN et al., 1977). Sua luminosidade bo-

Figura 2.3 - Mapas da emissão do contínuo e espectros nucleares para as galáxias Circinus, IC 5063, NGC 5643 e NGC 3393.



Mapas da emissão do contínuo no intervalo de 5450 Å a 5500 Å (painéis da esquerda) para as galáxias Circinus, IC 5063, NGC 5643 e NGC 3393. A barra de cores encontra-se em unidades de  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{spaxel}^{-1}$ . Nos painéis a direita são apresentados os espectros da região nuclear da respectiva galáxia.

Figura 2.4 - Mapas da emissão do contínuo e espectros nucleares para as galáxias NGC 5728, ESO 428 e NGC 1068.



Mapas da emissão do contínuo no intervalo de 5450 Å a 5500 Å (painéis da esquerda) para as galáxias NGC 5728, ESO 428 e NGC 1068. A barra de cores encontra-se em unidades de  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{spaxel}^{-1}$ . Nos painéis a direita são apresentados os espectros da região nuclear da respectiva galáxia.

lométrica é  $L_{\text{Bol}} = 1,7 \times 10^{10} L_{\odot}$  (MAIOLINO et al., 1998), a luminosidade do AGN é estimada em  $L_{\text{AGN}} = 10^{10} L_{\odot}$  (MOORWOOD et al., 1996) e a luminosidade de Eddington é  $L_{\text{Edd}} = 5,6 \times 10^{10} L_{\odot}$  (TRISTRAM et al., 2007). Possui *outflows* em formato de cone que se estendem em escalas de kiloparsecs mapeados por linhas de baixa e média ionização (SÁNCHEZ et al., 2006).

A galáxia é amplamente conhecida por apresentar linhas intensas de alta ionização no espectro nuclear (MOORWOOD et al., 1996; OLIVA et al., 1999) desde o ultravioleta até

o infravermelho médio. Curiosamente, os valores de FWHM das linhas coronais são muito semelhantes às linhas de baixa ionização ( $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ ) (OLIVA et al., 1999). Destaca-se a emissão de [Fe VII], [Fe X] e [Fe XI] no óptico (RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2006); [Si VI] e [Ca VIII] no infravermelho próximo (SÁNCHEZ et al., 2006); e [Mg VIII], [Si IX] e [Ne V] no infravermelho médio (MOORWOOD et al., 1996). Outras linhas de alta ionização já foram reportadas nesse objeto, por exemplo [S IX] (STORCHBERGMANN et al., 1999). No trabalho de Prieto et al. (2005) é determinada pela primeira vez o tamanho e a morfologia da região de linhas coronais em Circinus. Os autores utilizaram a técnica de óptica adaptativa e reportaram a detecção da linha coronal de [Si VII]  $2,48 \mu\text{m}$  no núcleo, se estendendo até uma distância de 30 pc do centro da galáxia.

Circinus apresenta uma taxa de formação estelar de  $\sim 1 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ , sendo que, nas regiões mais centrais ( $< 100 \text{ pc}$ ) a taxa de formação estelar é ainda menor ( $\sim 0,1 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ ) (ESQUEJ et al., 2014). Seu buraco negro supermassivo possui uma massa de  $1,7 \pm 0,3 \times 10^6 M_{\odot}$  (GREENHILL et al., 2003). Dados em raio-X apresentados por Matt et al. (2000) mostraram que a galáxia possui um AGN fortemente obscurecido e uma forte emissão de poeira.

#### 2.4.2 IC 5063

IC 5063 ( $z = 0,0113$ ) é uma galáxia com morfologia elíptica, sendo uma Seyfert 2 com disco molecular no seu centro. Essa galáxia possui um buraco negro com massa de  $2,8 \times 10^8 M_{\odot}$  (NICASTRO et al., 2003), uma luminosidade bolométrica de  $L_{\text{Bol}} = 7,6 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$  e  $L_{\text{Edd}} = 3,8 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$  (MORGANTI et al., 2007).

Morganti et al. (1998) fizeram um estudo da emissão rádio da galáxia utilizando dados do ATCA (Australia Telescope Compact Array). Os resultados mostraram uma emissão orientada em um PA de  $295^{\circ}$ . O jato rádio-emissor se estende a  $0,5 \text{ kpc}$  para cada lado da galáxia. A estrutura exhibe um formato de casulo nas direções leste e oeste do núcleo da galáxia, sendo traçados por uma emissão em 8 GHz (MORGANTI et al., 1998) e raio-X (GÓMEZ-GUIJARRO et al., 2017). Foram também identificados *outflows* na galáxia, traçados por hidrogênio neutro, gás ionizado e gás molecular.

É um dos primeiros objetos no qual foram descobertos *outflows* de gás de hidrogênio neutro (MORGANTI et al., 1998). Seu *outflow* apresenta uma taxa de  $\sim 12 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  (OOSTERLOO et al., 2017). O gás de hidrogênio molecular se movimenta a velocidades de até  $\pm 600 \text{ km s}^{-1}$  (relativa ao disco da galáxia) sugerindo que as moléculas foram aceleradas por choques dirigidos para o meio interestelar pela interação do jato

rádio-emissor (TADHUNTER et al., 2014).

### 2.4.3 NGC 5643

NGC 5643 ( $z = 0,004$ ) é uma galáxia espiral Seyfert 2, contendo um cone de ionização duplo que está na mesma direção de um jato duplo (SCHMITT et al., 1994). Sua luminosidade bolométrica é  $L_{\text{Bol}} = 1,0 \pm 0,5 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$  (ICHIKAWA et al., 2015) e a massa do buraco negro supermassivo é de  $M_{\text{BH}} = 2,75 \times 10^6 M_{\odot}$  (GOULDING et al., 2010). Estimamos a luminosidade Eddington a partir da massa do SMBH utilizando a Equação 1.1 resultando em  $L_{\text{Edd}} = 3,5 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ .

A galáxia apresenta dois lóbulos em rádio de cada lado (leste e oeste), alongados na mesma direção que a emissão óptica, sendo apresentado pela primeira vez por Morris et al. (1985) e estudada com detalhes por Leipski et al. (2006) encontrando um jato rádio difuso até uma distância de  $30''$  ( $\sim 2 \text{ kpc}$ ) do núcleo. No trabalho de Simpson et al. (1997), é apresentado um mapa de excitação. Os autores utilizaram a razão  $[\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\alpha$  para apresentar um gás de alta excitação distribuída em uma estrutura em formato de “V”.

No trabalho de Riffel et al. (2018) são utilizadas observações do GMOS (Gemini Multi-Object Spectrograph) para derivar uma taxa de *outflow* de gás ionizado de  $0,3 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . Em Davies et al. (2014) foi encontrada uma taxa de *outflow* de gás molecular de  $10 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ .

### 2.4.4 NGC 3393

NGC 3393 é uma galáxia classificada morfologicamente como uma espiral (Sa). Possui uma estrutura de jato duplo, que se estende por centenas de parsecs (COOKE et al., 2000). Detém uma luminosidade bolométrica estimada em  $7,8 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$  (KOSS et al., 2015).

No trabalho de Kondratko et al. (2008) foi derivada uma taxa de acreção de massa de  $0,04 - 0,1 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ , sobre um buraco negro de  $3,1 \pm 0,2 \times 10^7 M_{\odot}$ . A partir dessa massa, estimamos a luminosidade de Eddington de  $L_{\text{Edd}} = 3,9 \pm 0,3 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ . Em Finlez et al. (2018), ao mapear a galáxia usando a banda molecular de CO, encontraram uma componente com forte deslocamento para o azul em uma região perpendicular ao jato rádio, o que foi interpretado como um *outflow* equatorial.

A galáxia possui uma emissão de gás ionizado apresentando braços espirais, em forma de “S”, que coincide com a emissão rádio. No trabalho de Cooke et al. (2000),

é proposto que a extensão e a forma da emissão estendida ocorrem devida à fotoionização por uma fonte central obscurecida.

#### 2.4.5 NGC 5728

A NGC 5728 é uma galáxia classificada como SAB(r)a (VAUCOULEURS et al., 1991). Está localizada à distância de 37,5 Mpc (TULLY et al., 2016) o que resulta em uma escala de 180 pc por segundo de arco. A galáxia apresenta uma emissão coronal conhecida na região do infravermelho próximo (RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2011), sendo observada até uma distância de 300 pc do núcleo da galáxia (DURRÉ; MOULD, 2018b). Em Shimizu et al. (2019) é detalhado a estrutura e cinemática de um anel de formação estelar, contendo um *inflow* com uma taxa de  $\sim 1 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ .

Durré e Mould (2018a) realizaram um estudo detalhado sobre a região nuclear da galáxia utilizando dados IFU dos instrumentos SINFONI e MUSE. Os autores encontraram a massa do buraco negro supermassivo  $3,4 \times 10^7 M_{\odot}$ , uma massa de acreção do sistema de  $\sim 2,7 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  e uma massa de *outflow* de  $\sim 38 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . Foi estimada também uma energia cinética do *outflow* dado por  $\sim 1,5 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ , luminosidade bolométrica estimada em  $1,46 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$  e  $L_{\text{Edd}} = 4,4 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ .

Son et al. (2009) realizaram um estudo cinemático da galáxia utilizando as linhas [O III]  $\lambda 5007$  e  $\text{H}\alpha$ . Os autores relatam a descoberta de dois núcleos com um ângulo de inclinação de  $\sim 56^{\circ}$  em relação ao plano do céu.

#### 2.4.6 ESO 428-G14

A ESO 428-G14 é uma galáxia espiral intermediária (SBA) classificada como Seyfert 2. Seu redshift é de  $z = 0,00544$ , onde  $1''$  corresponde a 92 pc (FALCKE et al., 1996), localizada à distância de 23,5 Mpc. Possui emissão coronal na região do infravermelho próximo (RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2011) e uma luminosidade bolométrica estimada em  $2 \pm 1 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$  (MAY et al., 2018). Seu buraco negro supermassivo contém uma massa estimada em  $2 \pm 1 \times 10^7 M_{\odot}$  (FABBIANO et al., 2019). Estimamos a luminosidade de Eddington a partir da massa do SMBH chegando em  $L_{\text{Edd}} = 2,5 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ .

Os resultados apresentados por May et al. (2018) indicam que a taxa de *outflow* de  $\sim 8 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  derivada nesse objeto é similar à apresentada por objetos rádio-emissores.

A galáxia possui uma correspondência conhecida das emissões em óptico, contínuo

rádio e raio-X. Essas correspondências mostram ser consistentes com simulações de interação entre o jato rádio e o disco molecular (FABBIANO et al., 2018).

#### 2.4.7 NGC 1068

A galáxia NGC 1068 é possivelmente o AGN de tipo II mais estudado da literatura. Está localizada à distância de 16,9 Mpc, resultando em uma escala de 82 pc por segundo de arco. Apresenta um pseudo bojo que é excessivamente massiva quando comparado ao seu buraco negro central (KORMENDY; HO, 2013). Seu buraco negro supermassivo possui uma massa de  $M = 8,0 \pm 0,3 \times 10^6 M_{\odot}$  (LODATO; BERTIN, 2003). No trabalho de Pier et al. (1994) foi obtido uma luminosidade bolométrica nuclear de  $L_{\text{Bol}} \sim 8 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ . No trabalho de Revalski et al. (2021) foi estimada uma luminosidade de Eddington de  $L_{\text{Edd}} = 2 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$  e uma taxa de Eddington de 0,5.

Em García-Burillo et al. (2016), os autores utilizaram dados do ALMA para mapear o gás molecular na galáxia. Os autores ajustaram uma SED (Spectral Energy Distribution) com modelos de um toróide CLUMPY a partir dos modelos de Nenkova et al. (2008a), Nenkova et al. (2008b) e obtiveram um valor de massa do toróide de  $M_{\text{gás}}^{\text{torus}} = 1 \pm 0,3 \times 10^5 M_{\odot}$  e um raio do toróide de  $R_{\text{torus}} = 3,5 \pm 0,5 \text{ pc}$ .

Em Rodríguez-Ardila et al. (2006) foi realizado um estudo da extensão das linhas coronais da galáxia. Os autores encontraram emissão estendida da linha de [Fe VII]  $\lambda 6087$  localizada até 210 pc ao norte do núcleo. Os autores também encontraram a linha de [Si VI]  $\lambda 19630$  estendida, porém embora a mesma possua o triplo da intensidade ela encontra-se com a metade da extensão da linha de [Fe VII]. Eles ainda relataram a detecção das linhas de [Fe X] e [Si VII] à distância de  $\sim 100 \text{ pc}$  do núcleo da galáxia.



### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo iremos descrever as principais ferramentas utilizadas para o tratamento e análise dos dados. Iremos discutir as etapas realizadas no cubo, tais como: corte, re-binagem, localização do AGN, correção por avermelhamento Galáctico, ajuste da população estelar, ajuste de componentes gaussianas para as linhas de emissão e correção por avermelhamento intrínseco na galáxia.

#### 3.1 Análise inicial do cubo

Após obtenção do cubo de dados, uma primeira etapa do trabalho consiste na análise visual da qualidade dos dados. Para isso, utilizamos o programa QFITSVIEW. Esta ferramenta nos permite determinar a região do cubo que será utilizada na análise, qual a melhor opção de re-binagem e quais são as principais linhas espectrais que podemos encontrar em cada galáxia. Realizaremos abaixo uma pequena descrição das principais características do QFITSVIEW.

QFITSVIEW é uma ferramenta para manipulação de arquivos FITS. Foi desenvolvida por Thomas Ott e encontra-se disponível para download na página <http://mpe.mpg.de/~ott/QFitsView/>. Trata-se de um código livre, escrito em C++ que permite exibir e manipular arquivos em uma, duas ou três dimensões. Em sua janela principal existem diversas opções que facilitam a manipulação dos dados que estão sendo visualizados, tais como barra de ferramentas, região de imagem integrada do cubo de dados e região do espectro de um determinado *spaxel*, selecionado a partir da posição do cursor no cubo. O software é útil também para gerar mapas 2D de uma determinada linha espectral, podendo o usuário selecionar a região da linha e a região de céu.

#### 3.2 Corte, re-binagem e correção por avermelhamento do cubo

Em algumas galáxias, como por exemplo a NGC 5728, a nossa análise se restringe a uma região de cerca de 25% do campo do MUSE. Sendo assim, um segundo passo consiste na seleção da região mais relevante do campo do MUSE. Essa etapa nos proporciona um ganho considerável no tempo de análise computacional. Em uma terceira etapa realizamos a re-binagem dos spaxels presentes no cubo. A re-binagem dos dados é importante para o aumento do sinal ruído das linhas espectrais. As re-binagens foram realizadas na configuração  $2 \times 2$  e  $3 \times 3$ , ou seja, 4 e 9 spaxels formaram um novo spaxel. Em alguns casos utilizamos os dados sem re-binagem, principalmente quando existia um bom sinal-ruído ou quando a galáxia estava mais

Tabela 3.1 - Tamanho final da imagem, re-binagem do cubo de dados e valores de extinção utilizado para cada galáxia da amostra.

Galáxia	Tamanho final (arcseg $\times$ arcseg)	Binagem	Extinção galáctica (Mag)
Circinus	60 $\times$ 60	3 $\times$ 3	2,1 <sup>1</sup>
IC 5063	32 $\times$ 31	1 $\times$ 1	0,2 <sup>2</sup>
NGC 5643	40 $\times$ 31	1 $\times$ 1	0,5 <sup>2</sup>
NGC 3393	40 $\times$ 41	1 $\times$ 1	0,2 <sup>2</sup>
NGC 5728	31 $\times$ 32	2 $\times$ 2	0,3 <sup>2</sup>
ESO 428	32 $\times$ 22	1 $\times$ 1	0,5 <sup>2</sup>
NGC 1068	60 $\times$ 60	3 $\times$ 3	0,1 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Obtido de [For et al. \(2012\)](#); <sup>2</sup> Obtidos em [Schlafly e Finkbeiner \(2011\)](#).

distante e não pretendíamos perder resolução espacial. Na Tabela 3.1 é apresentado o tamanho final de cada cubo após o corte e a re-binagem adotada para cada galáxia.

Posteriormente, para cada spaxel foi realizada a correção por extinção da nossa Galáxia. Com esse intuito utilizamos a lei de extinção de Cardelli, Clayton e Mathis ([CARDELLI et al., 1989](#)). No caso de Circinus, foi utilizado o valor de extinção de 2,1 mag, conforme apresentado no trabalho de [For et al. \(2012\)](#). Para os demais objetos, a extinção Galáctica foi extraída do NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*). Os valores de extinção de cada galáxia da amostra são apresentados na última coluna da Tabela 3.1.

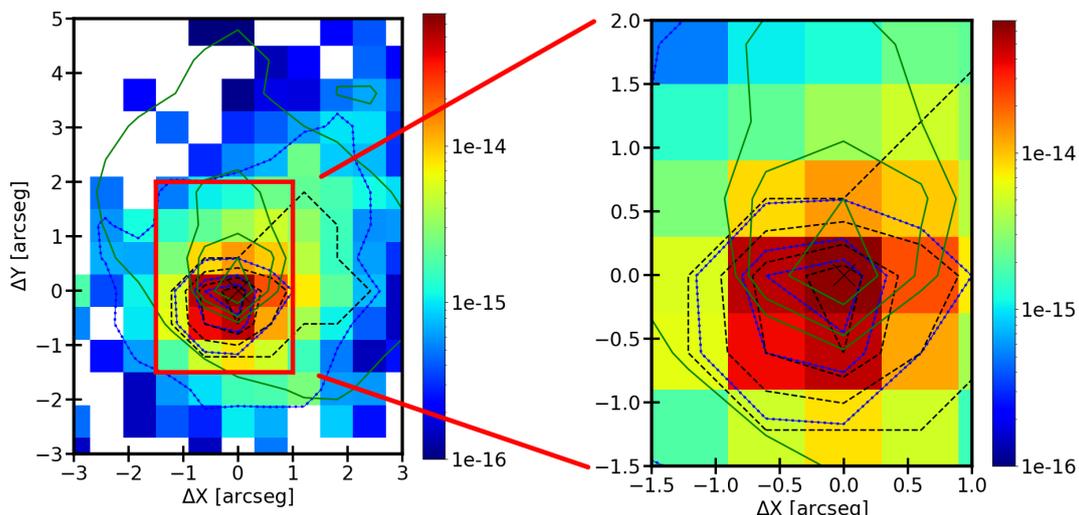
### 3.3 Determinação da posição do AGN

Para determinar de forma acurada a posição do AGN em cada galáxia, utilizamos como base os mapas de fluxos obtidos para as linhas de mais alta ionização tais como [Fe x]  $\lambda$ 6375, [Fe xi]  $\lambda$ 7892 e [Ar xi]  $\lambda$ 6917, juntamente com uma região do contínuo com comprimento de onda centrado em 7000 Å em uma janela de 10 Å de largura. Escolhemos as linhas acima devido ao seu alto potencial de ionização (IP > 200 eV) e assumindo que elas possuem seu máximo de brilho nas proximidades do AGN. Cada spaxel do cubo já re-binado abrange uma região quadrada com comprimento lateral entre 12 pc e 78 pc. Sendo assim, é pouco provável que os máximos de emissão dessas linhas estejam fora da posição do AGN. Na Figura 3.1 é apresentado um exemplo de determinação da posição do AGN para a galáxia Circinus. Com esse objetivo, podemos observar a distribuição de fluxo de [Fe x]  $\lambda$ 6375 com contornos do contínuo em 7000 Å (em verde), contorno da linha [Fe xi]  $\lambda$ 7892 (em azul) e o contorno da linha de [Ar xi]  $\lambda$ 6917 em preto. O ponto com o símbolo ‘X’ representa

o spaxel mais intenso, adotado como posição da fonte central. Como todos os nossos mapas mostram posições relativas, assumiremos como localização do AGN a posição  $\Delta X = 0, \Delta Y = 0$ .

A Figura 3.1 fornece informação adicional relacionada com a extensão da emissão coronal na região central de Circinus, principalmente para as linhas de  $[\text{Fe XI}] \lambda 7892$  e  $[\text{Ar XI}] \lambda 6917$ . Em [Oliva et al. \(1994\)](#), foi observado  $[\text{Fe XI}] \lambda 7892$  se estendendo até 5 pc do AGN. No entanto, identificamos aqui  $[\text{Fe XI}] \lambda 7892$  a uma distância de até 70 pc do AGN. Adicionalmente, encontramos  $[\text{Ar XI}] \lambda 6917$  a 25 pc do AGN. Posteriormente, na Seção 4.1, confirmaremos ainda a presença de gás emissor de  $[\text{S XII}] \lambda 7611$  (potencial de ionização 505 eV) à distância de até  $\sim 40$  pc do núcleo.

Figura 3.1 - Indicação da posição do AGN na galáxia Circinus.



Mapa de fluxos para linha de  $[\text{Fe X}] \lambda 6375$  com contornos do contínuo em  $7000 \text{ \AA}$  (em verde), contorno da linha  $[\text{Fe XI}] \lambda 7892$  (em azul) e o contorno da linha de  $[\text{Ar XI}] \lambda 6917$  em preto. No mapa à direita temos um zoom na imagem e o ponto com o símbolo ‘X’ representa o centro adotado para Circinus.

### 3.4 Subtração do contínuo estelar

Após a seleção da região de interesse e a binagem em cada cubo, procedemos a realizar a subtração do contínuo estelar. Este passo é necessário já que o contínuo de todos os objetos da amostra está dominado por absorções de origem estelar. Isso indica que as linhas de  $\text{H}\alpha$  e  $\text{H}\beta$ , necessárias na determinação do avermelhamento intrínseco, podem ter uma parte dos seus fluxos absorvidos por causa do contínuo estelar subjacente. Ainda, a região ao redor de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  apresenta, em alguns

casos, saltos e depressões típicos de um contínuo estelar.

Para ajustar este contínuo foi utilizado o código de síntese de população estelar STARLIGHT (FERNANDES et al., 2005), juntamente com o conjunto de populações estelares de E-MILES (VAZDEKIS et al., 2016). Apresentaremos a seguir uma descrição resumida sobre o funcionamento deste programa.

### 3.4.1 STARLIGHT

STARLIGHT (FERNANDES et al., 2005) pode ser utilizado para identificar qual o tipo de população estelar que está presente em uma determinada região de uma galáxia a partir do espectro da mesma. O código ajusta uma função para um espectro observado  $O_\lambda$  utilizando a combinação de espectros de populações estelares da base adotada ( $b_{i,\lambda}$ ). Possui uma base de populações estelares disponível, porém, uma base diferente pode ser fornecida pelo usuário a partir de uma seleção mais adequada para sua análise.

Para o nosso trabalho, utilizamos a base de populações estelares E-MILES (VAZDEKIS et al., 2016). A seleção de modelos de população foi fornecida pelo colaborador Dr. Luis Gabriel Dahmer Hahn. Optamos por essa base por ser mais atual que a base padrão do STARLIGHT e por ser uma biblioteca que inclui modelos com idades menores que 1 Gyr. Dessa forma, foi realizada uma seleção de 30 modelos de populações estelares, seguindo as frações de populações estelares propostas por Riffel et al. (2009) contendo estrelas jovens,  $x_Y$  ( $t_j \leq 5 \times 10^7$  anos), estrelas de idade intermediária  $x_I$  ( $1 \times 10^8 \leq t_j \leq 2 \times 10^9$  anos) e estrelas velhas,  $x_0$  ( $t_j > 10^9$  anos).

Existe a possibilidade de adicionar uma lista de linhas de emissão para mascarar o contínuo, de modo que o código utilize apenas o contínuo estelar e as linhas de absorção fora das máscaras no momento do ajuste. O programa conta com diversas opções de ajustes para o usuário, como lei de extinção, limites de ajuste e limites de interações. No nosso trabalho utilizamos a lei de extinção proposta em Cardelli et al. (1989). As demais configurações foram deixadas no modo padrão. A Equação 3.1 apresenta a solução para o espectro modelo  $M_\lambda$ , com  $N_*$  espectros da base escolhida.  $M_0$  é o fluxo sintético normalizado;  $x_j$  é a contribuição da população estelar normalizada com sua respectiva idade e metalicidade. O termo  $b_{j,\lambda}$  é o espectro da população estelar normalizado;  $r_\lambda = 10^{-0,4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$  é a extinção para o comprimento de onda  $\lambda$ ; o símbolo  $\otimes$  representa o operador convolução;  $G(\nu_*, \sigma_*)$  modela a distribuição gaussiana utilizada para os movimentos estelares na linha de visada, com velocidade centrada em  $\nu_*$  e dispersão  $\sigma_*$ .

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \sum_{j=1}^{N_*} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \otimes G(\nu_*, \sigma_*) \quad (3.1)$$

O código promove a minimização do  $\chi^2$  (ver Equação 3.2) para encontrar a melhor solução. O termo  $\omega_\lambda$  é o inverso do erro do espectro observado.

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [(O_\lambda - M_\lambda)\omega_\lambda]^2 \quad (3.2)$$

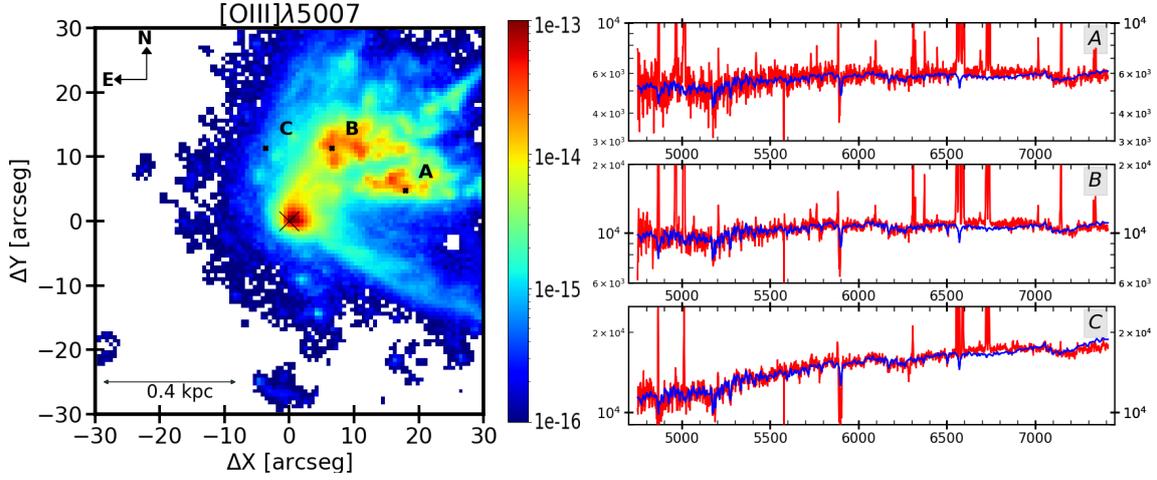
Para encontrar o melhor ajuste, o código pondera a contribuição de cada tipo de população estelar que melhor se ajusta ao espectro observado, fornecendo assim para o usuário os tipos de populações dominantes na galáxia e adicionalmente qual a idade, massa e metalicidade. Neste trabalho, o objetivo de utilizar o STARLIGHT é apenas subtrair a população estelar. Embora o programa forneça informações valiosas sobre o conteúdo e histórico de formação estelar do objeto, deixaremos essa análise para um estudo futuro.

É importante mencionar que o STARLIGHT leva também em consideração a presença de um contínuo de tipo não-térmico, atribuído ao AGN. Esta componente é representada por uma função de lei-de-potência  $F_\lambda \propto \lambda^\alpha$ , onde  $\alpha$  é o índice espectral. Em todos os ajustes,  $\alpha$  foi fixado no valor de  $-1,5$ .

Uma vez ajustado o contínuo estelar em cada spaxel dos cubos da amostra, procedemos à subtração desta componente. Teoricamente, o resíduo deve conter apenas a emissão nebular presente nas galáxias.

Na Figura 3.2, apresentamos alguns exemplos de ajuste do contínuo estelar realizado em Circinus usando o código STARLIGHT. Três spaxels identificados pelas letras A, B e C, localizados em diferentes regiões do objeto são mostrados em destaque. Note que realizamos a subtração da população estelar no intervalo espectral entre 3750 até 7400 Å. Para comprimentos de onda acima de 7400 Å, utilizamos os espectros originais, sem subtração estelar, uma vez que essa região possui poucas linhas a serem estudadas e mesmo as linhas estudadas não são consideravelmente afetadas pelas populações estelares. Esse é o caso, por exemplo, de [S III]  $\lambda$ 9069.

Figura 3.2 - Exemplos de ajustes de populações estelares para 3 spaxels selecionados.



No painel à esquerda temos a distribuição de fluxo para linha de [O III]  $\lambda 5007$ . A barra de cores encontra-se em unidades de  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{spaxel}^{-1}$ . Nos painéis da direita são apresentados três exemplos de ajustes realizados pelo STARLIGHT. Em vermelho tem-se o espectro observado e os modelos de populações estelares encontram-se em azul. O eixo Y encontra-se em unidades de  $10^{-20} \times \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{spaxel}^{-1}$ .

### 3.5 Ajuste das linhas de emissão

Com o intuito de medir parâmetros tais como fluxo, posição e largura das linhas em emissão detectadas em cada spaxel, construímos um código próprio que pode ser utilizado em qualquer cubo IFU. O código faz o ajuste para todos os spaxels de um cubo de modo automático, apenas com uma pré-configuração realizada pelo usuário. Para cada linha espectral foram ajustadas uma ou duas componentes gaussianas. Todos os códigos escritos e descritos neste trabalho foram produzidos em linguagem PYTHON.

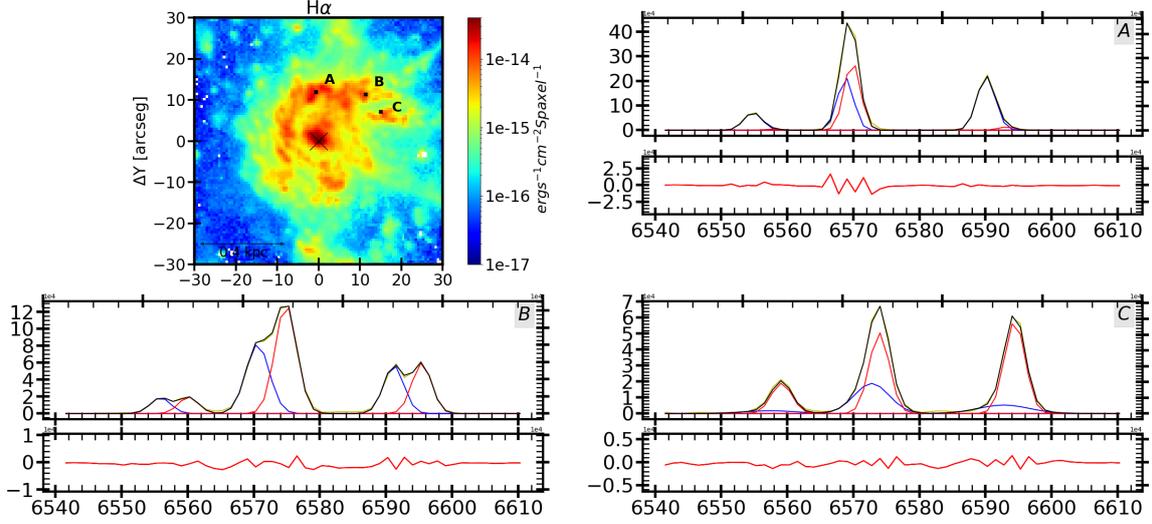
O programa ajusta componentes gaussianas de forma a reproduzir as linhas espectrais encontradas, já adicionando os vínculos dessas linhas quando existirem. Para os ajustes gaussianos utilizamos a função `CURVE_FIT` disponível no módulo `SCIPY.OPTIMIZE`. Essa função realiza um ajuste por mínimos quadrados e utiliza-se de uma função de entrada. No nosso caso, poderiam ser de 1 a 6 gaussianas na mesma função dependendo de quais linhas de emissão seriam ajustadas.

Para cada linha espectral ajustada, foram testadas 1 ou 2 componentes gaussianas. Chamamos de componente azul a linha deslocada para a região azul do espectro e

a componente vermelha deslocada para região vermelha do espectro. Em ambas as linhas, os deslocamentos são em relação ao comprimento de onda em laboratório. Na Figura 3.3, apresentamos exemplos de ajustes de linhas espectrais com duas componentes gaussianas para cada linha da galáxia Circinus. No canto superior esquerdo da figura apresentamos o mapa de emissão para a linha de  $H\alpha$ , juntamente com três regiões espectrais onde são apresentados os ajustes gaussianos para  $[N II] \lambda 6549$ ,  $H\alpha$  e  $[N II] \lambda 6583$ . Na figura pode-se ver os três spaxels escolhidos, chamados de A, B e C. A cor azul representa a componente ajustada deslocada para o azul e a cor vermelha a componente deslocada para o vermelho. A soma de todas as componentes é apresentada com a linha na cor preta. O espectro observado encontra-se em amarelo. Logo abaixo de cada espectro é apresentado o resíduo da subtração do espectro observado e o espectro ajustado. Os valores de  $\lambda$  central das componentes gaussianas são apresentados já corrigidos pela velocidade sistêmica da galáxia, adotada por  $434,1 \text{ km s}^{-1}$  (MEYER et al., 2004). Vale ressaltar que até aqui os ajustes gaussianos nos permitiram obter informações de cada linha espectral, como fluxo, velocidades e FWHM das linhas. A partir destes valores, será possível obter os principais parâmetros físicos do gás.

O método para derivar os parâmetros físicos tais como densidade, temperatura, taxa de *outflows*, massa de *outflows* serão apresentados nos Capítulos 4, 5 e 6.

Figura 3.3 - Exemplos de ajustes gaussianos utilizado nos dados MUSE.

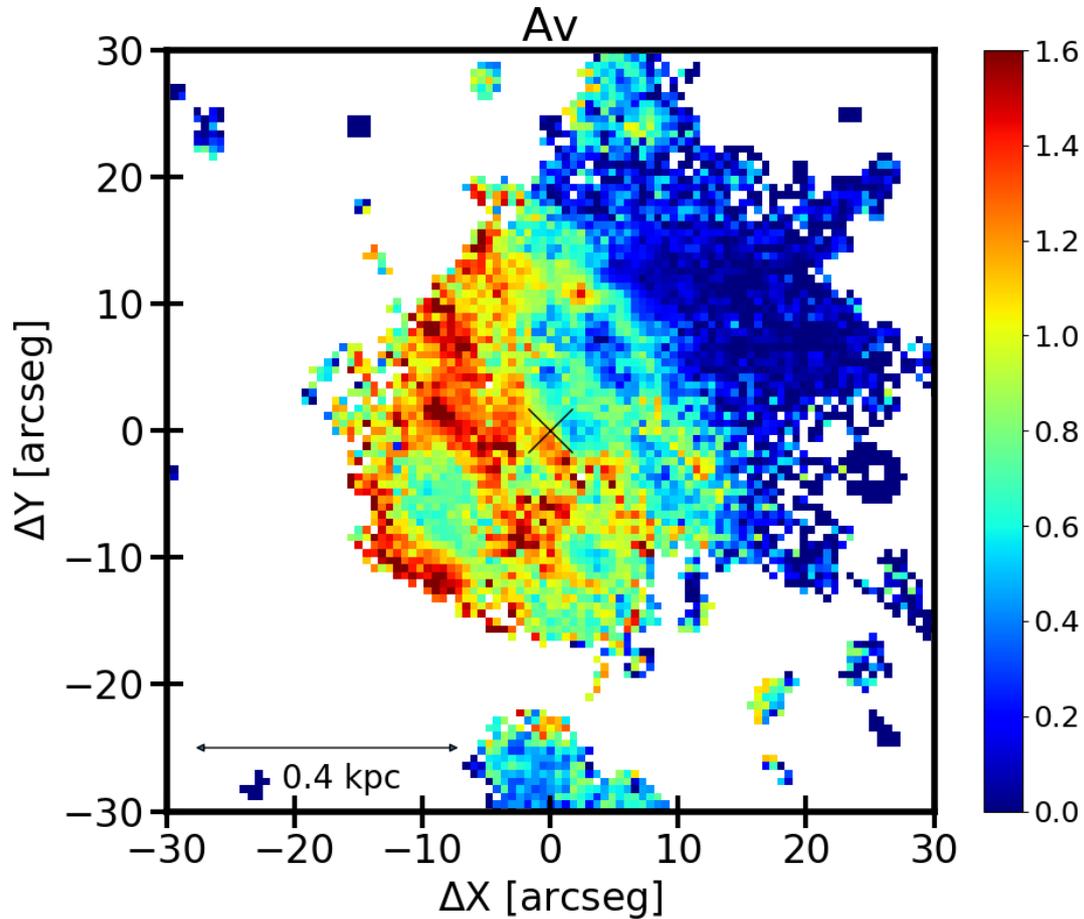


No painel superior esquerdo é apresentado o mapa de fluxos para a linha de  $H\alpha$  para a galáxia Circinus. Em cada um dos pontos A, B e C; são apresentados os ajustes para as linhas de emissão de  $[NII] \lambda 6548$ ,  $H\alpha$  e  $[NII] \lambda 6583$ . Para cada ponto são apresentadas as componentes ajustadas azul e vermelha. Tem-se também abaixo de cada espectro os resíduos de cada ajuste nos três pontos selecionados.

Para a determinação do avermelhamento intrínseco, utilizamos a lei de Cardelli, Clayton and Mathis (CCM). O valor de extinção foi encontrado a partir da Equação 3.3. Para cada spaxel foram obtidas as razões das linhas  $H\alpha$  e  $H\beta$ . Encontramos assim os valores de avermelhamento em todos os pontos do campo. Um exemplo de mapa de extinção é apresentado na Figura 3.4, sendo realizado para galáxia Circinus. Percebemos que na região central ( $< 200$  pc), os valores de avermelhamento estão acima de 1,0 mag a leste e 0,5 mag a oeste. Nas regiões mais externas ( $> 200$  pc) no sentido noroeste, os valores de avermelhamento são muito baixos, com valores entre 0,1 mag a 0,4 mag. Os resultados apresentados aqui, são semelhantes aos encontrados por Mingozzi et al. (2019), porém eles não realizaram a correção de extinção pela nossa Galáxia. Além disso a subtração de população estelar realizada por esses autores foi realizada com o programa Penalized Pixel-Fitting (pPXF; (CAPPELLARI; EMSELLEM, 2004)).

$$E(B - V)_{H\alpha/H\beta} = -2,31 \times \log \left( \frac{3,1}{H\alpha/H\beta} \right) \quad (3.3)$$

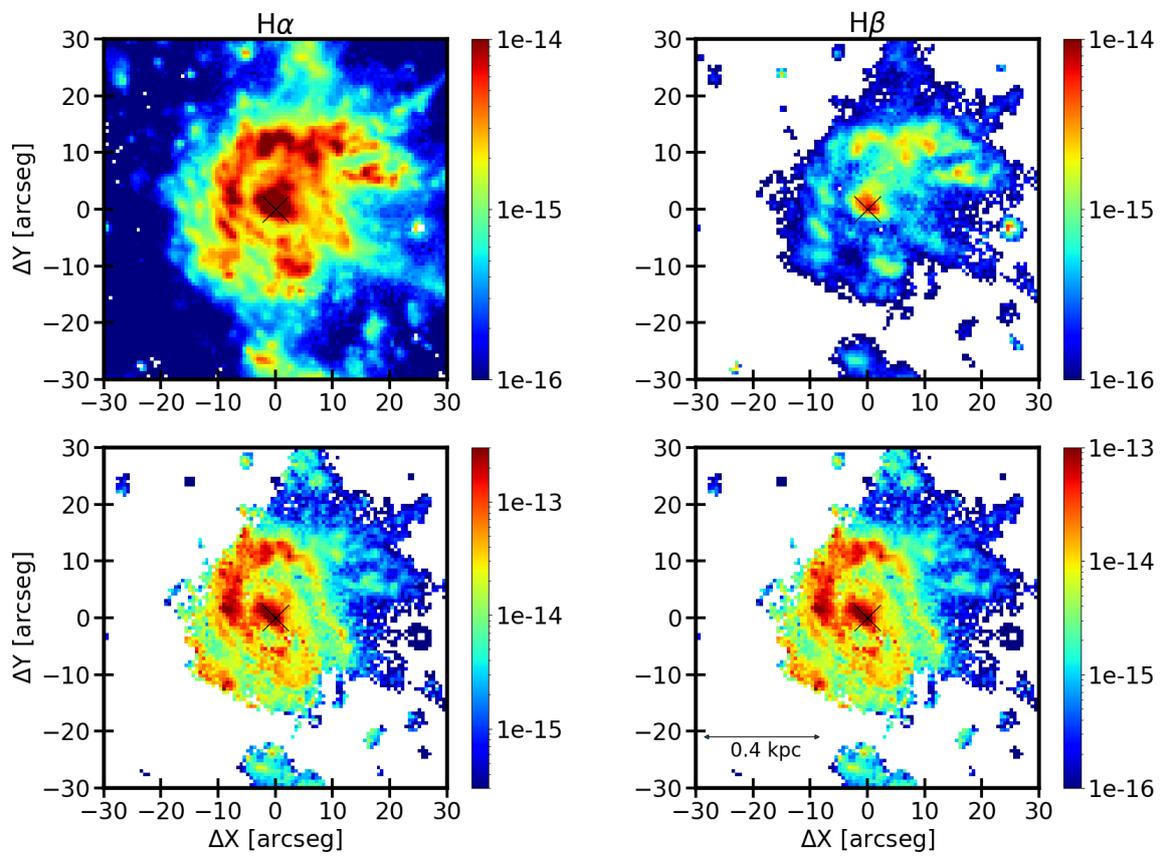
Figura 3.4 - Mapa de extinção da galáxia Circinus.



O símbolo 'X' próximo ao centro da imagem indica a região do centro da galáxia.

Para cada componente (azul e vermelha) foram realizadas as correções por avermelhamento. Na Figura 3.5 apresentamos exemplos de distribuição de fluxos das linhas de emissão  $H\alpha$  e  $H\beta$ , somando as componentes azul e vermelha, antes e depois da correção por avermelhamento. Os mapas na coluna da esquerda são de  $H\alpha$  antes da correção por avermelhamento (imagem acima) e depois da correção por avermelhamento (imagem abaixo). A direita apresentamos o mapa de emissão para a linha de  $H\beta$  antes da correção por avermelhamento (acima) e depois da correção (abaixo). Percebe-se que a área da imagem para linha de  $H\alpha$  encontra-se menor após a correção de avermelhamento. Isso ocorre pois espacialmente qualquer imagem que foi corrigida por avermelhamento deve ser no máximo co-espacial com a linha de  $H\beta$ . A linha de  $H\beta$  é encontrada em uma região menor que  $H\alpha$  e  $[O III] \lambda 5007$ . Assim após a correção por avermelhamento os mapas de fluxos acabam perdendo alguns spaxels.

Figura 3.5 - Mapas de fluxos para as linhas de emissão  $H\alpha$  e  $H\beta$  antes e após a correção por avermelhamento.



Os mapas de fluxos antes da correção de avermelhamento são apresentados nos mapas nos painéis superiores e os mapas de fluxos após a correção de avermelhamento são apresentados nos painéis inferiores.

### 3.6 Aplicação dos modelos de fotoionização

Com o intuito de modelar os mecanismos de fotoionização que estão presentes nas galáxias utilizamos o código SUMA (CONTINI; ALDROVANDI, 1983) para simular as condições físicas de uma nuvem de gás sob o efeito acoplado da fotoionização por uma fonte de radiação central e choques. O código permite estudar as condições físicas da NLR, a qualquer distância do AGN. SUMA tem passado por sucessivas melhoras e atualizações desde sua criação. Atualmente encontra-se escrito em FORTRAN77. O código tem sido aplicado com sucesso em um grande número de AGNs, principalmente na modelagem de espectros com linhas de emissão desde o ultravioleta até o infravermelho próximo (CONTINI et al., 2003; RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2005; CONTINI, 2015; DORS et al., 2021).

O código SUMA calcula o espectro de linhas e o contínuo emitido por uma nuvem exposta à radiação da fonte central, combinado com processos de choque. Na modelagem é utilizada a simetria plano-paralela. Os fótons ionizantes da fonte central iluminam a nuvem pelo lado próximo. Já o contínuo produzido pelo efeito do choque alcança a nuvem na borda que sofre diretamente o efeito do choque. Os principais parâmetros de entrada utilizados para o cálculo no SUMA são: a velocidade do choque ( $V_s$ ), a densidade atômica do pré choque  $n_0$  e o campo magnético (adotado como  $B_0 = 10^{-4}$  gauss). Esses parâmetros são utilizados nos cálculos das equações de Rankine-Hugoniot, combinadas com as equações de compressão (COX, 1972), aplicadas nas regiões da frente do choque e na jusante. As equações de compressão são resolvidas ao longo de cada fatia de gás a fim de obter o perfil de densidade das nuvens emissoras. A radiação contínua fotoionizante do AGN é representada por um fluxo  $F$  de radiação na forma de lei de potência em unidade de fótons  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{eV}^{-1}$  no limite de Lyman. Os índices espectrais adotados são  $\alpha_{UV} = -1,5$  e  $\alpha_X = -0,7$ , onde  $\alpha_{UV}$  corresponde à lei de potência na região do ultravioleta e  $\alpha_X$  à da região de raios-X.

A região da nuvem de gás é dividida em regiões sequenciadas de fatias plano-paralelas (até 300) com diferentes espessuras geométricas calculadas automaticamente seguindo o gradiente de temperatura. A radiação difusa secundária é emitida a partir das fatias de gás aquecido, tanto pelo fluxo de radiação que atinge o gás quanto pelos choques. A radiação primária e secundária são calculadas por transferência de radiação. Os cálculos são iniciados na frente do choque onde o gás é comprimido e termalizado adiabaticamente, chegando a um máximo de temperatura na região pós-choque imediata  $T \sim 1,5 \times 10^5 (V_s/100 \text{ km s}^{-1})^2$ .  $T$  diminui na jusante, levando

à recombinação de gás. A taxa de resfriamento é calculada em cada fatia. As regiões emissoras de linha e contínuo cobrem um conjunto de nuvens fragmentadas. A espessura geométrica  $D$  das nuvens é um parâmetro de entrada que é calculado de forma consistente com as condições físicas e abundância de elementos do gás emissor.

As abundâncias fracionárias dos íons são calculadas resolvendo as equações de ionização para cada elemento (H, He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Cl, Fe) e para cada nível de ionização. Em seguida, as razões de linha calculadas, integradas ao longo da largura geométrica da nuvem, são comparadas com aos valores observados. O processo de cálculo é repetido, alterando os parâmetros de entrada até que os dados observados sejam reproduzidos pelos resultados do modelo, no máximo em 10 – 20% para as relações de linhas mais fortes e dentro de 50% para as mais fracas.

Por fim, é analisado o espectro da nuvem e obtida as razões de linhas presentes, tais como  $[O\ I] / H\beta$ ,  $[N\ II] / H\beta$ ,  $[S\ III] / H\beta$ ,  $[O\ III] / H\beta$  e  $[Fe\ VII] / H\beta$ . Utilizamos as razões de linhas para encontrar o melhor modelo obtido pelo SUMA. Os resultados do SUMA para cada nuvem predizem qual a contribuição dos modelos dominados por choques (chamados de *Shock Dominated*, SD) e dominados pela radiação (chamados de *Radiation Dominated*, RD). A solução geral será uma combinação da contribuição dos dois regimes (SD e RD).

## 4 GALÁXIA CIRCINUS

Circinus é o AGN de tipo II mais próximo da Terra, a uma distância de  $4,2 \pm 0,8$  Mpc (FREEMAN et al., 1977). A escala de distância projetada é de 20 pc para cada 1 arcsec. Pelo fato de estar localizada próxima ao plano da nossa Galáxia, foi descoberta somente no final da década de 70 (FREEMAN et al., 1977). Apresenta morfologia espiral (SAb), com ângulo de inclinação de aproximadamente  $65^\circ$ . Possui um buraco negro supermassivo com uma massa de  $1,7 \pm 0,3 \times 10^6 M_\odot$  (GREENHILL et al., 2003). Circinus é conhecida pela emissão estendida associada a um *outflow* em formato de cone que se estende em escalas de quilopasecs, traçado principalmente por linhas de média ionização (SÁNCHEZ et al., 2006). A taxa de formação estelar é de 3 a  $8 M_\odot \text{ ano}^{-1}$  (FOR et al., 2012), sendo que nas regiões mais centrais ( $< 100$  pc) a taxa de formação estelar é  $\sim 0,1 M_\odot \text{ ano}^{-1}$  (ESQUEJ et al., 2014).

Além do *outflow* de gás ionizado, existe evidência da presença de um *outflow* de gás molecular com velocidades consistentes com a do primeiro (ZAKAMSKA et al., 2016). Observações em rádio apontam para a presença de um jato com um PA (ângulo de posição) de  $295^\circ \pm 5^\circ$  (ELMOUTTIE et al., 1998).

No seu espectro óptico/NIR, Circinus é amplamente conhecida por apresentar linhas intensas de alta ionização (OLIVA et al., 1994; RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2006), incluindo [S IX] (STORCHI-BERGMANN et al., 1999) no infravermelho e a linha de [Fe XIV] (OLIVA et al., 1999) no óptico. Parte dessa emissão tem sido resolvida espacialmente usando AO (PRIETO et al., 2005; SÁNCHEZ et al., 2006; MÜLLER-SÁNCHEZ et al., 2011). Esses trabalhos apontam para gás de alta ionização estendido em escalas de dezenas de parsecs da fonte central. Ainda, Oliva et al. (1999) relatam a detecção de [Fe VII] no cone de ionização, a  $\sim 300$  pc do núcleo, em um PA de  $318^\circ$  do AGN.

Pelo fato de ser a Seyfert 2 mais próxima, sendo possível atingir uma resolução espacial de umas poucas dezenas de parsecs ainda sem AO, este objeto é o alvo inicial deste trabalho. Procuramos a detecção de emissão coronal em escalas maiores das já relatadas, visto o espectro de alta ionização que a caracteriza.

Neste capítulo apresentaremos, pela primeira vez na literatura, uma análise detalhada das condições físicas da região emissora de gás de alta ionização (HIG, do inglês *High-ionization gas*) assim como um estudo detalhado da cinemática estelar e do gás ionizado em Circinus. Estimamos a massa e taxa de *outflow* do HIG utilizando dois métodos diferentes: o primeiro utiliza-se dos fluxos de [O III] medido em

uma estrutura bicônica (CANO-DÍAZ et al., 2012). O segundo utiliza o fluxo de  $H\beta$  em uma estrutura de casca esférica (ROSE et al., 2018).

Os dados que serão utilizados neste capítulo foram previamente apresentados no Capítulo 2. Os resultados descritos a seguir são derivados do cubo original re-binado, já subtraído do contínuo estelar e corrigido pela extinção atmosférica.

#### 4.1 Distribuição do gás de baixa, média e alta ionização para galáxia Circinus

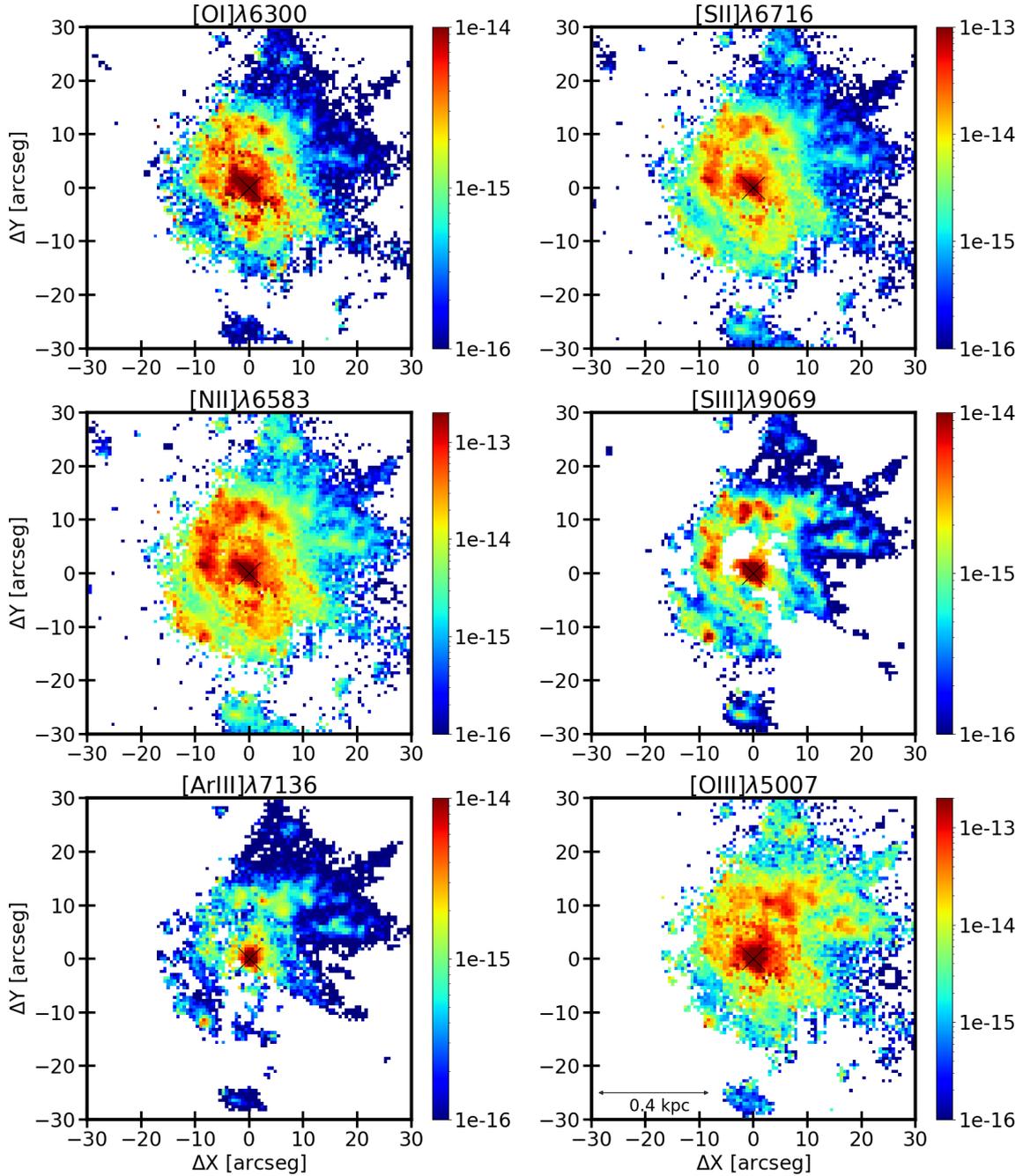
Apresentamos aqui a distribuição espacial das linhas em emissão mais importantes identificadas nos dados obtidos pelo MUSE. Foram produzidos mapas de fluxos para as seguintes linhas de baixa e média ionização (ver Figura 4.1):  $[O\ I]\ \lambda 6300$ ,  $[S\ II]\ \lambda 6716$ ,  $[N\ II]\ \lambda 6583$ ,  $[S\ III]\ \lambda 9069$ ,  $[Ar\ III]\ \lambda 7136$  e  $[O\ III]\ \lambda 5007$ . O mapa de fluxo para linha de  $H\alpha$  foi mostrado na Figura 3.5. Veja que as linhas de baixa ionização  $H\alpha$ ,  $[O\ I]\ \lambda 6300$ ,  $[S\ II]\ \lambda 6716$  e  $[N\ II]\ \lambda 6583$  são mais proeminentes no braço espiral central. As linhas de média ionização ( $[S\ III]\ \lambda 9069$ ,  $[Ar\ III]\ \lambda 7136$  e  $[O\ III]\ \lambda 5007$ ) mostram uma maior contribuição na região noroeste da galáxia quando comparadas com as linhas de baixa ionização.

Foram produzidos também mapas das linhas de alta ionização identificadas (ver Figura 4.2), sendo elas:  $He\ II\ \lambda 5412$ ,  $[Ar\ V]\ \lambda 7006$ ,  $[Fe\ VII]\ \lambda 6087$ ,  $[Fe\ X]\ \lambda 6375$ ,  $[Fe\ XI]\ \lambda 7892$ ,  $[Ar\ X]\ \lambda 5533$ ,  $[Ar\ XI]\ \lambda 6917$  e  $[S\ XII]\ \lambda 7611$ . Repare que os mapas de fluxos acima revelam estruturas estendidas apenas na região circumnuclear e ao noroeste do núcleo. Por isso as regiões NE, SE e SO não são mostradas. Linhas de mais alta ionização tais como  $[Fe\ XI]$  e  $[S\ XII]$  foram observadas apenas no núcleo e ao redor deste.

Ressaltamos aqui que Circinus possui linhas coronais identificadas na literatura até o potencial de ionização de 361 eV ( $[Fe\ XIV]\ \lambda 5303$ , Oliva et al. (1999)). Aqui, apresentamos pela primeira vez a detecção da linha de  $[S\ XII]\ \lambda 7611$  (potencial de ionização 505 eV), se estendendo até uma distância de  $\sim 40$  pc do núcleo (ver Figura 4.3).

Na Figura 4.3 apresentamos o mapa de distribuição de fluxo de  $[Fe\ VII]\ \lambda 6087$ . À direita, temos os fluxos integrados das regiões A, B, C e Nuc (núcleo). À esquerda temos respectivamente as detecções para linhas de  $[S\ XII]\ \lambda 7611$  e  $[Fe\ X]\ \lambda 6375$ . Foi possível realizar a detecção da linha de  $[S\ XII]$  na região nuclear e em uma segunda região (C) localizada aproximadamente  $\sim 40$  pc do núcleo. A linha de  $[Fe\ X]\ \lambda 6375$  é claramente identificada na região central (NUC) e nas regiões B e C.

Figura 4.1 - Mapas de fluxos para linhas de baixa e média ionização em Circinus.

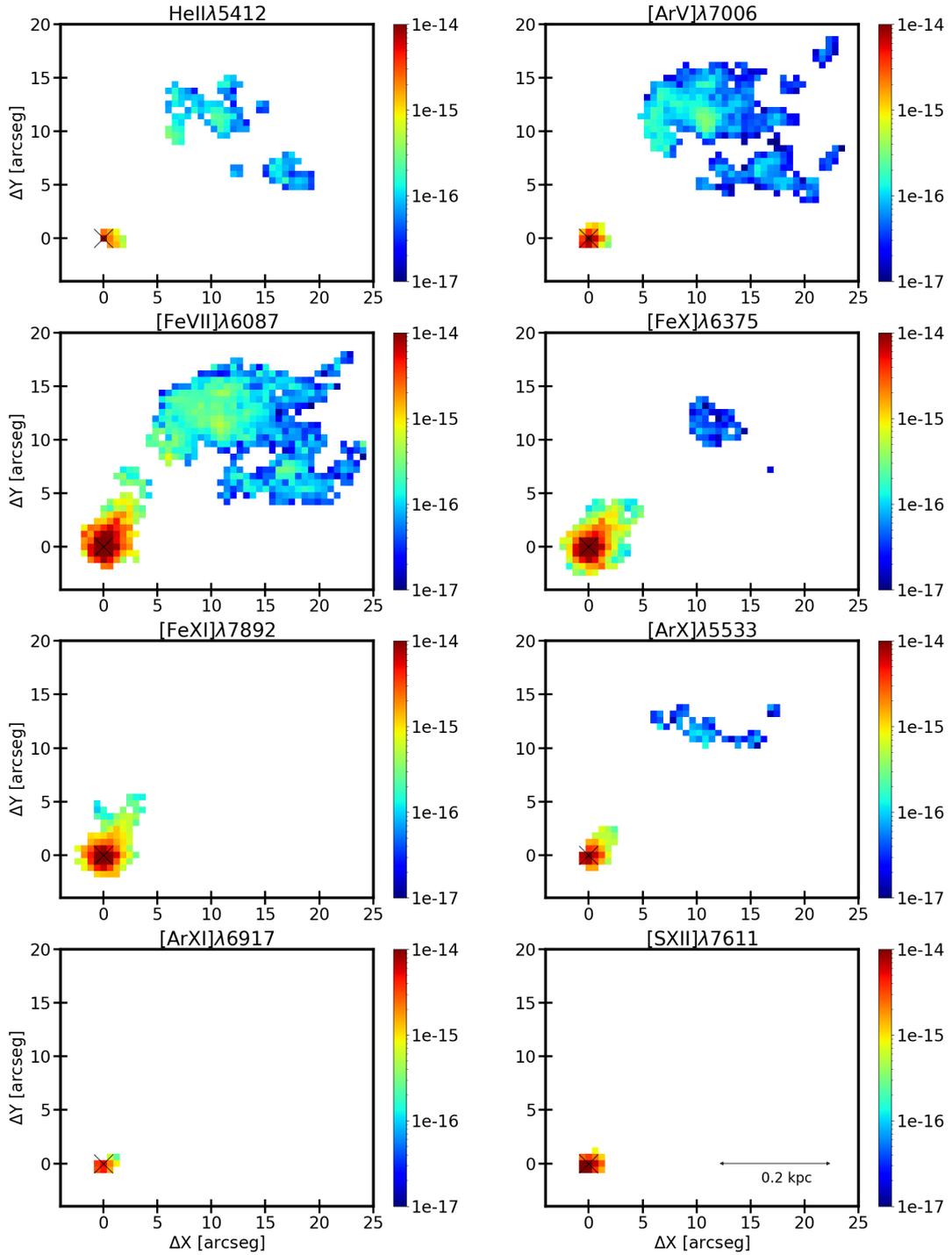


Apresentamos os resultados para as linhas de  $[O\text{I}]\lambda 6300$ ,  $[S\text{II}]\lambda 6716$ ,  $[N\text{II}]\lambda 6583$ ,  $[S\text{III}]\lambda 9069$ ,  $[Ar\text{III}]\lambda 7136$  e  $[O\text{III}]\lambda 5007$ .

## 4.2 Primeira detecção de gás coronal estendido no cone de Circinus

Apresentamos aqui, pela primeira vez na literatura, a detecção de emissão coronal estendida em escalas de centenas de parsecs em Circinus. Esta emissão inicia em

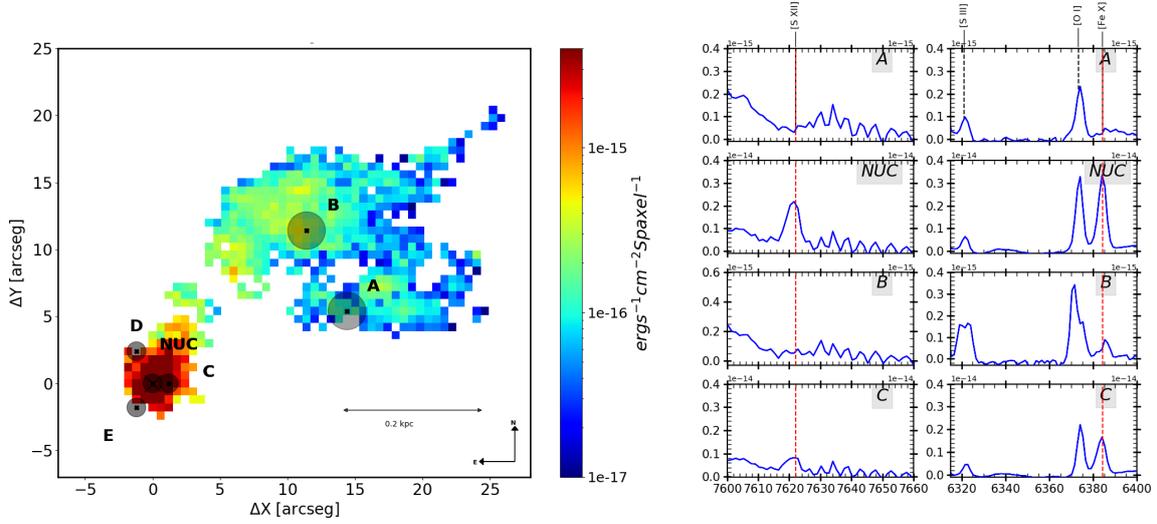
Figura 4.2 - Mapas de fluxos para linhas de alta ionização em Circinus.



Mapas de fluxos para linhas de  $\text{He II } \lambda 5412$ ,  $[\text{Ar V}] \lambda 7006$ ,  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$ ,  $[\text{Fe X}] \lambda 6375$ ,  $[\text{Fe XI}] \lambda 7892$ ,  $[\text{Ar X}] \lambda 5533$ ,  $[\text{Ar XI}] \lambda 6917$  e  $[\text{S XII}] \lambda 7611$ .

$\sim 200$  pc do AGN, na direção noroeste, e é observada até  $\sim 700$  pc do AGN na região do cone de ionização. Na Figura 4.4 apresentamos o mapa de emissão para

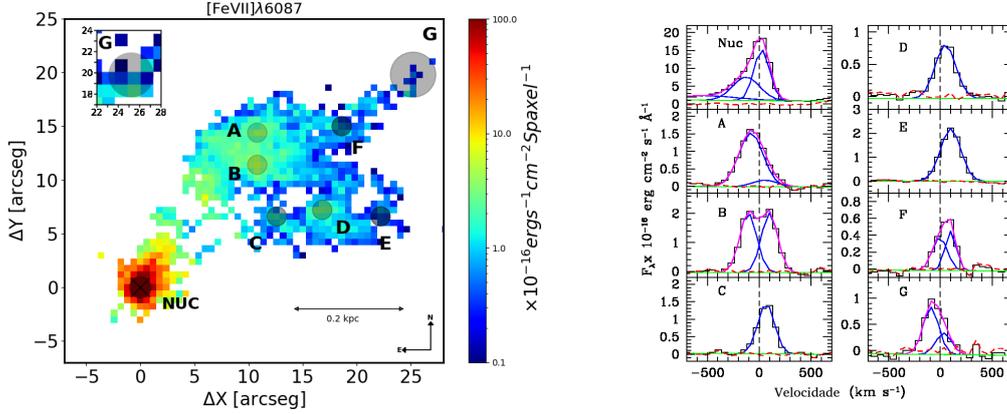
Figura 4.3 - Emissão coronal em Circinus.



Mapa de fluxos para linha de [Fe VII], apresentando algumas regiões do espectro onde foram integrados os spaxels, juntamente tem-se os espectros na região das linhas de [S XII]  $\lambda 7611$  e [Fe X]  $\lambda 6375$  para 4 regiões diferentes.

[Fe VII]  $\lambda 6087$  (painel à esquerda). Os perfis de linha de emissão de [Fe VII] nessa região exibem uma estrutura complexa, com duas componentes na maior parte dos spaxels da região noroeste. A intensidade relativa entre os picos e as larguras das componentes individuais variam consideravelmente. Isso é mostrado nos painéis da direita da Figura 4.4, onde são apresentados os perfis das linhas de emissão de [Fe VII] extraídos em diferentes posições da emissão estendida. O ajuste gaussiano realizado nessas linhas evidencia a necessidade de duas componentes nas posições Nuc, A, B, F e G para reproduzir adequadamente os perfis observados. Os perfis de linha nas posições C, D e E são principalmente desviados para o vermelho, com apenas um pico visível. Co-espacial à emissão de [Fe VII], as linhas de H I, [O III], [O II], [N II], [O I], [S II] e [S III] são também observadas (não mostrados aqui). Em regiões de duplo pico (ver por exemplo os painéis A e B da Figura 4.4), as larguras e intensidade relativa entre os picos são variáveis. Note que na maior parte da emissão coronal, a componente vermelha é claramente observada (painéis C e D), com picos do centroide da linha deslocados para o vermelho em  $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ . No ponto G, o centroide de um dos picos sofre um desvio para o azul em uma quantidade semelhante. Interpretamos este resultado em termos de camadas de gás em expansão, com as componentes se aproximando e recuando, observadas em algumas posições, enquanto em outras apenas uma componente é visível.

Figura 4.4 - Mapa de emissão coronal de Circinus e espectros em 8 regiões da galáxia.



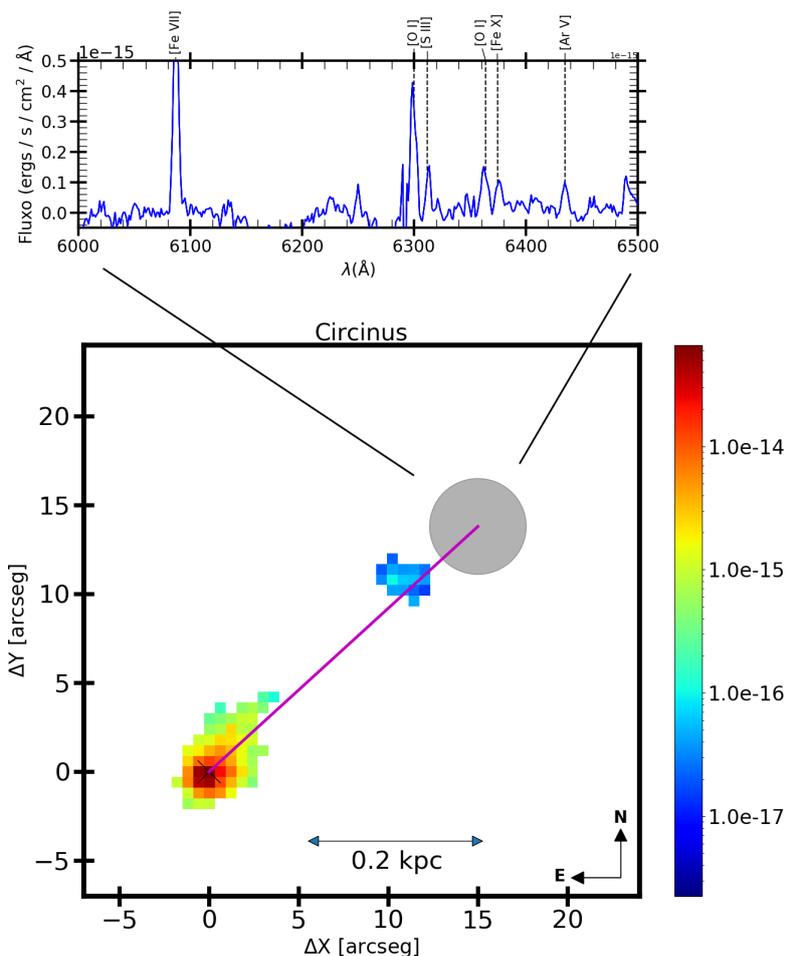
No painel à esquerda é apresentado o mapa de emissão de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$ . As letras A até G indicam as regiões dos perfis de linhas mostrados no painel à direita. A posição do AGN é rotulada como “Nuc”. Adicionalmente, no canto superior esquerdo do mapa apresentamos a região G, com os spaxels agrupados no tamanho de  $1,2'' \times 1,2''$  para aumentar o sinal/ruído ( $S/N > 3$ ). No painel à direita são apresentados os perfis de linhas de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  no espaço de velocidade detectados no gás de alta ionização estendido. A linha vertical tracejada marca a velocidade sistêmica da galáxia. Em cada painel, o perfil observado (histograma preto) foi ajustado com funções gaussianas (linhas azuis). O ajuste total está em magenta, o nível do contínuo em verde e o resíduo do ajuste em vermelho.

Na Figura 4.5, apresentamos pela primeira vez na literatura, o mapa de emissão da linha de  $[\text{Fe X}]$ . Percebe-se uma emissão mais próxima do núcleo com uma morfologia e fluxo muito semelhante à emissão de  $[\text{Fe VII}]$ , sendo que em alguns spaxels a emissão de  $[\text{Fe X}]$  é mais intensa que a de  $[\text{Fe VII}]$ . No mapa produzido com binagem de  $3 \times 3$ , identificamos emissão de  $[\text{Fe X}]$  em aproximadamente 14 spaxels, com um fluxo máximo de  $5 \times 10^{-16} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{spaxel}^{-1}$  a 300 pc do AGN. Contudo, emissão de  $[\text{Fe X}]$  mais estendida foi identificada ao integrar uma região circular com raio de  $2,4''$  à distância de  $408 \pm 48 \text{pc}$ . Essa máxima emissão está alinhada, em relação ao AGN, com a região de 14 spaxels identificada no mapa de fluxos de  $[\text{Fe X}]$ .

### 4.3 Distribuições das razões de linhas

A partir dos fluxos obtidos na Seção 4.1, podemos encontrar a distribuição das razões de linhas para galáxia Circinus. Na Figura 4.6 apresentamos as razões de 15 linhas espectrais em relação à linha de  $\text{H}\beta$ . Todos os fluxos utilizados aqui foram corrigidos por avermelhamento, tal como explicado no Capítulo 3. Em todos os painéis da Figura 4.6 os contornos em preto correspondem à razão  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087 / \text{H}\beta$ , onde

Figura 4.5 - Mapa de fluxos da emissão coronal para a galáxia Circinus.



Mapa de emissão de [Fe X] e o espectro da emissão mais estendida dessa linha, sendo integrado no círculo cinza de raio  $2,4''$  (painel superior). A linha magenta indica a máxima extensão encontrada para a linha.

podem ser vistos três níveis principais de intensidade (observar o primeiro gráfico da Figura 4.6) com valores de razões de linha 0,001; 0,08 e 0,17.

Verificamos que as linhas de alta ionização, em geral, possuem uma razão por  $H\beta$  que aumenta com a distância do AGN. A razão de  $[Fe VII] / H\beta$ , por exemplo, apresenta valores da ordem de  $10^{-2}$  a uma distância de 240 pc enquanto que a 700 pc possui uma razão de  $\sim 0,1$ . Um comportamento semelhante é observado em  $[O III]$  e  $[Ar V]$ , no qual verifica-se um aumento em um fator de  $\sim 5$  no fluxo de linha em relação a  $H\beta$  ao se distanciar do AGN.

Em contraste, razões de linhas que envolvem íons de baixa ionização apresentam um

comportamento inverso às de alta ionização. As razões decrescem ao nos afastarmos do AGN. Assim, para linhas de baixa ionização, temos um padrão que já era esperado para um modelo de fotoionização pela fonte central. No entanto, para as linhas de alta ionização, como [Fe VII], não podemos explicar o padrão encontrado apenas assumindo que o AGN é a única fonte de fotoionização do gás.

#### 4.4 Condições físicas do gás

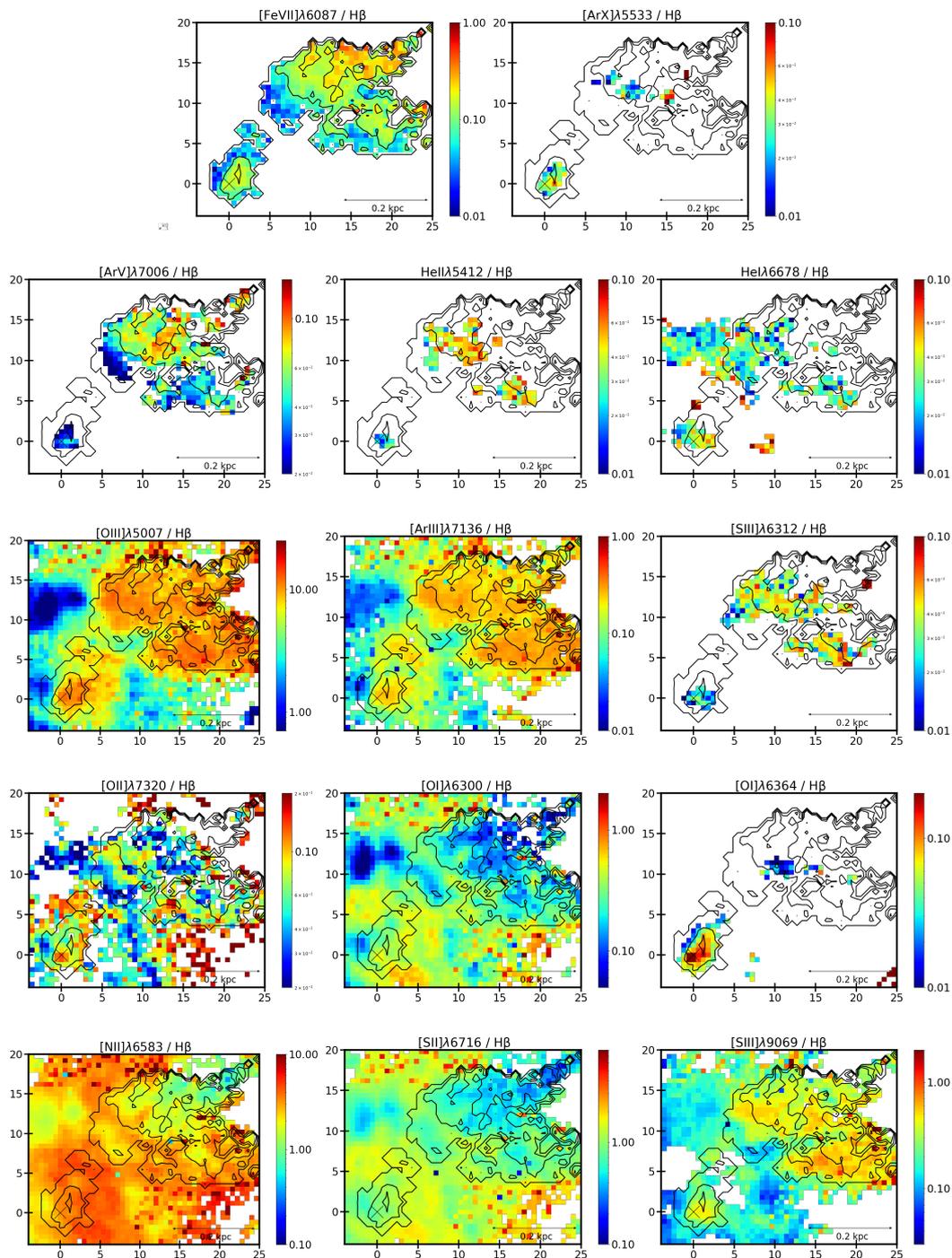
Para um melhor entendimento dos fenômenos que estão gerando os possíveis *outflows* em Circinus, além de obter as pistas quanto aos processos que deram origem aos fluxos de alta ionização detectados (RODRÍGUEZ-ARDILA; FONSECA-FARIA, 2020), foram estudadas as condições físicas através da análise da temperatura e densidade do gás.

Foram obtidos valores de temperaturas para cada spaxel a partir das linhas de [S III] utilizando a Equação 4.1 (ver em Osterbrock e Ferland (2006)). Os dados do MUSE possuem um limite de comprimento de onda em 9350 Å. Portanto, a linha de [S III]  $\lambda 9532$  não pode ser observada. Para contornar esse problema foi utilizada a relação teórica do coeficientes de emissividade  $j_{9532}$  e  $j_{9068}$  que é fixo no valor de 2,44 (OSTERBROCK, 1989). Produzimos assim mapas de temperatura para toda região do campo do MUSE onde as linhas de [S III] possuíam um valor de sinal ruído maior que 3 (ver Figura 4.7). Para determinação da temperatura foi utilizada uma densidade de  $400 \text{ cm}^{-3}$ . Esse valor representa uma média dos valores de densidade encontrados na região estudada (ver Figura 4.8). É importante ressaltar que uma variação de densidade em um intervalo de  $200 \text{ cm}^{-3}$  a  $800 \text{ cm}^{-3}$  não altera significativamente os valores encontrados para temperatura do gás.

$$[\text{S III}] \frac{j_{\lambda 9532} + j_{\lambda 9069}}{j_{\lambda 6312}} = \frac{5,44 \times \exp(2,28 \times 10^4/T)}{1 + 3,5 \times 10^{-4} \times n_e/T^{1/2}} \quad (4.1)$$

Na análise dos espectros, foi identificado que a linha de [S III]  $\lambda 6312$  possui um sinal pelo menos 10 vezes menor que [S III]  $\lambda 9069$ . Portanto, a determinação da  $T_e$  foi realizada em todos os spaxeis onde a relação sinal/ruído é  $> 3$ , sendo limitada pela região mais compacta definida por [S III]  $\lambda 6312$ . Esta é detectada principalmente nos spaxels onde a linha de [Fe VII] também é observada. Portanto, a temperatura eletrônica determinada através de [S III], em uma primeira aproximação, é a mesma da linha de ferro coronal. Aqui, assumimos que as nuvens que emitem [S III] são co-espaciais com aquelas que produzem [Fe VII].

Figura 4.6 - Mapas de razões de fluxos para Circinus.



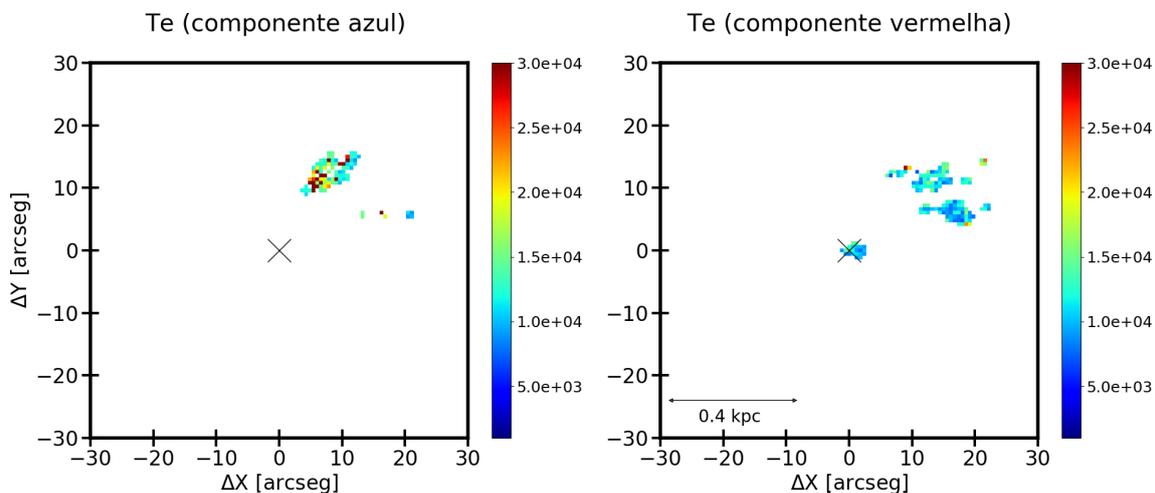
Em contorno temos as razões de  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  com níveis: 0,001, 0,08 e 0,17. As regiões em branco correspondem aos spaxels onde as linhas não foram detectadas.

Devido aos espectros apresentarem duplo pico nas linhas de  $[\text{S III}]$ , na determinação da temperatura utilizamos separadamente as componentes azul e vermelha, uma vez

que se espera não se tratar do mesmo gás. Para cada linha foram também realizadas as correções de avermelhamento utilizando os métodos apresentados na seção 3. Na determinação da temperatura, alguns spaxels ajustados não são apresentados, uma vez que não houve a convergência na Equação 4.1.

Percebe-se nos mapas de temperatura que o valor da componente azul se manteve, em média, duas vezes maior que a temperatura da componente vermelha. Em particular, existe uma pequena região com temperatura de  $3 \times 10^4$  K enquanto na maior parte das demais regiões possuem um valor de  $\sim 1,5 \times 10^4$  K.

Figura 4.7 - Mapas de temperatura para a galáxia Circinus.



Mapas de temperatura para componente azul e vermelha produzidos a partir das linhas de [S III], os valores estão em Kelvin (maiores informações ver no texto do Capítulo 4.4).

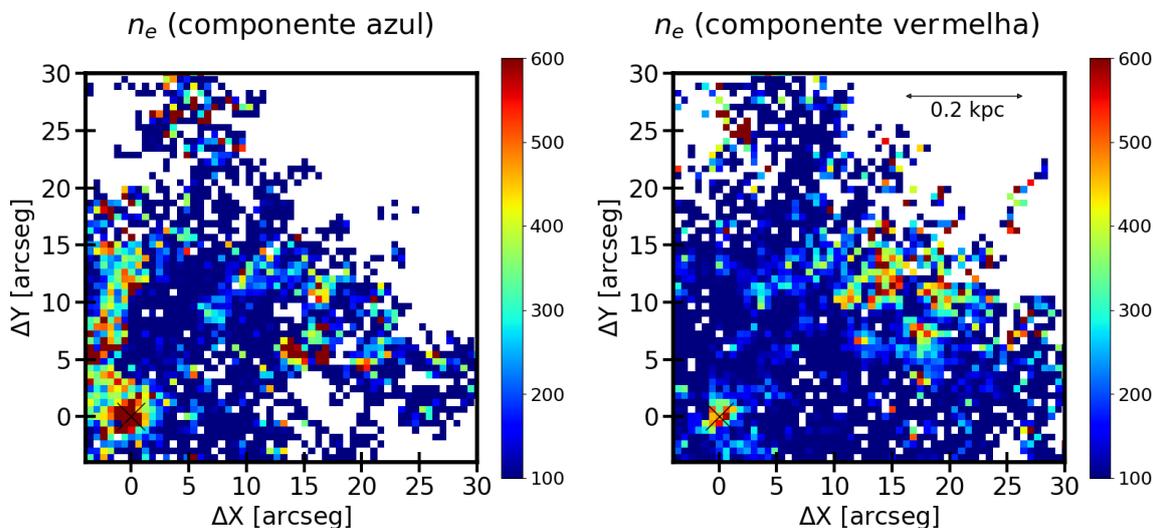
Foram obtidos também os valores de densidade eletrônica para cada spaxel. Para isso, utilizamos os fluxos das linhas de [S II]  $\lambda 6716$  e [S II]  $\lambda 6732$ . Neste cálculo empregamos separadamente as componentes azul e vermelha. Note que esta separação encontra-se principalmente na região NO da galáxia. Nos quadrantes NE, SE e SO a linha de [S II] apresentam preferencialmente uma única componente. Assim determinamos, a razão de fluxo  $R = I_{\lambda 6716}/I_{\lambda 6732}$ , que foi utilizado para a obtenção da densidade de acordo com a Equação 4.2. Aqui, assumimos uma temperatura eletrônica de 15000 K.

$$\log(n_e(\text{cm}^{-3})) = 0,0543 \tan(-3,0553R + 2,8506) + 6,98 - 10,6905R + 9,9186R^2 - 3,5442R^3 \quad (4.2)$$

A Equação 4.2 foi derivada do trabalho de Proxauf et al. (2014), que incorpora correções à equação inicial derivada por Osterbrock (1989). Realizamos assim o cálculo de densidade para as componentes azul e vermelha das linhas de emissão. Na Figura 4.8 são apresentados os mapas de densidade resultantes.

Nota-se que existem duas regiões de alta densidade. Uma localizada próximo ao AGN, e a outra ao noroeste, coincidindo com a região estendida do gás de [Fe VII]  $\lambda 6087$ . Os valores mais altos para  $n_e \sim 400 \text{ cm}^{-3}$ , foram principalmente encontrados co-espaciais com as regiões de altas temperaturas, o que pode ser interpretado como um indicador de gás chocado.

Figura 4.8 - Mapa de densidade para Circinus.



Mapa de densidade produzido a partir das linhas de [N II]. Os valores estão em unidades de partículas/cm<sup>3</sup>.

#### 4.5 Cinemática estelar e do gás ionizado em Circinus

O estudo da cinemática estelar e do gás de uma galáxia é de extrema importância para separar a contribuição da componente originada no disco daquela originada fora do plano da galáxia ou que não gira junto com esta. Esse é o caso de gás localizado

em um cone de ionização ou em uma componente de *outflow* devida à passagem de um jato rádio-emissor.

No caso de Circinus, separar as diferentes componentes cinemáticas não é uma tarefa fácil, principalmente devido à forte contribuição da galáxia hospedeira. Portanto, para isolar as diferentes componentes, vamos primeiro determinar a cinemática estelar e depois, a cinemática do gás.

#### 4.5.1 Cinemática estelar

Foi realizada, primeiramente, uma modelagem utilizando os dados da galáxia hospedeira e um modelo de rotação. O modelo de rotação adotado aqui foi proposto por Bertola et al. (1991) para ajuste da velocidade de rotação de um disco na linha de visada (ver Equação 4.3). Para a cinemática estelar, utilizamos a linha de absorção de Ca II  $\lambda 8662$ . Com esse intuito, foi desenvolvido um código em PYTHON para encontrar o melhor ajuste para os parâmetros da Equação 4.3.

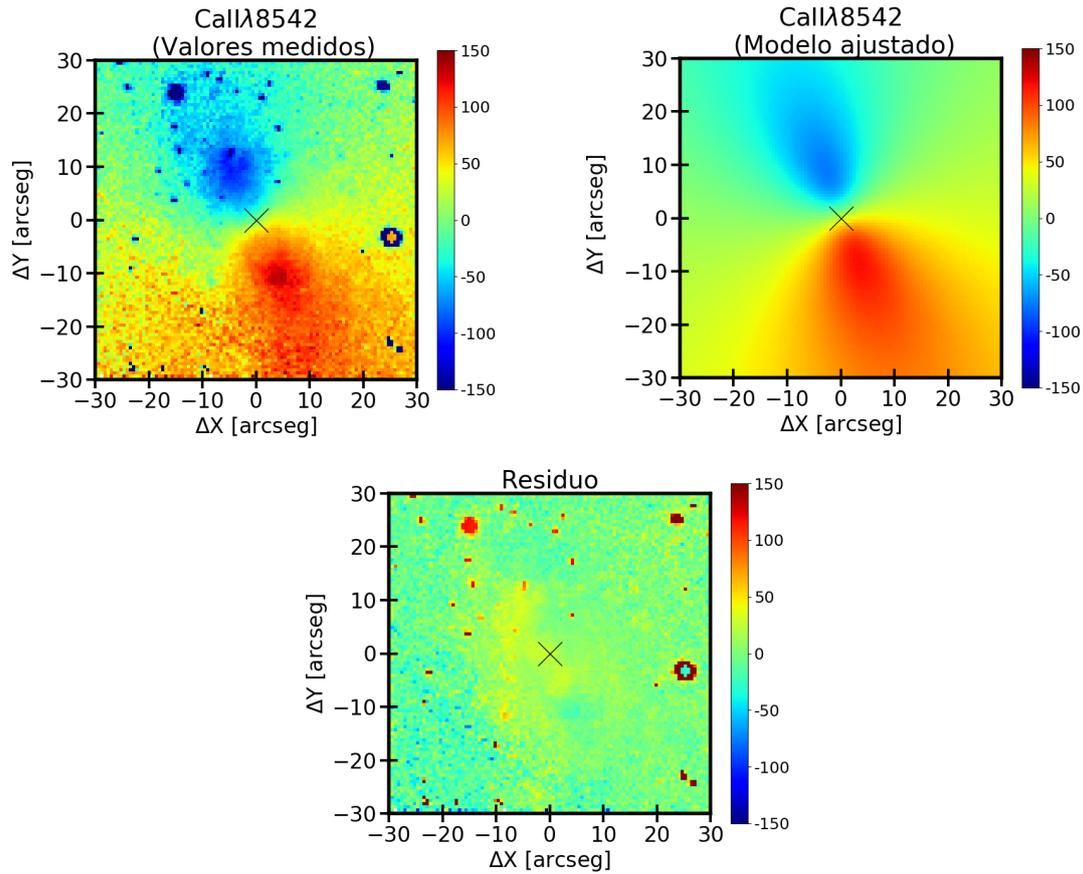
$$v_{mod}(R, \Psi) = v_{sys} + \frac{AR \cos(\Psi - \Psi_0) \sin \theta \cos^p \theta}{\{R^2[\sin^2(\Psi - \Psi_0) + \cos^2 \theta \cos^2(\Psi - \Psi_0)] + c_0^2 \cos^2 \theta\}^{p/2}} \quad (4.3)$$

Na Equação 4.3,  $v_{mod}$  é a velocidade ajustada na linha de visada de um observador;  $v_{sys}$  é a velocidade sistêmica da galáxia,  $A$  é a amplitude da velocidade;  $\Psi_0$  é a posição angular da linha dos nodos;  $\theta$  é a inclinação do disco em relação ao plano do céu e  $c_0$  é o parâmetro de concentração. Este último é definido como raio onde a curva apresenta 70% da velocidade máxima de rotação. O achatamento da curva de uma galáxia é mensurado através de  $p$ , que assume valores entre 1 e 1,5 para regiões externas da galáxia. Quando  $p = 1$ , a curva de rotação é assintoticamente plana em grandes raios; para  $p = 1,5$ , a galáxia possui uma massa finita.  $R$  é a distância radial ao núcleo e  $\Psi$  é o ângulo onde encontra-se o raio  $R$  medido no plano do céu.

Na Figura 4.9 é apresentado o mapa de velocidade para linha de absorção de Ca II. No painel superior à esquerda temos os valores observados de velocidade para cada spaxel e à direita encontra-se o modelo ajustado a partir de Equação 4.3. Do ajuste, foram obtidos os seguintes parâmetros:  $v_{sys} = 21,2 \pm 0,7 \text{ km s}^{-1}$  (a velocidade sistêmica real ajustada é  $455,3 \text{ km s}^{-1}$ , lembrando que adotamos uma correção de velocidade sistêmica inicial de  $434,1 \text{ km s}^{-1}$  (MEYER et al., 2004));  $a = 714 \pm 50 \text{ km s}^{-1}$ ;

$\Psi_0 = 289,6^\circ \pm 0,2^\circ$ ;  $\theta = 50,3^\circ \pm 0,5^\circ$ ;  $c_0 = 7,1'' \pm 0,2''$ ; e  $p = 1,61 \pm 0,02$ . No painel inferior da Figura 4.9 é apresentado o resíduo obtido a partir da subtração dos valores de velocidade ajustados e modelados. Pode-se verificar que os resíduos se mantiveram menores que  $50 \text{ km s}^{-1}$ , o que implica que a cinemática estelar é bem descrita por um disco em rotação.

Figura 4.9 - Mapa de velocidades para Circinus.



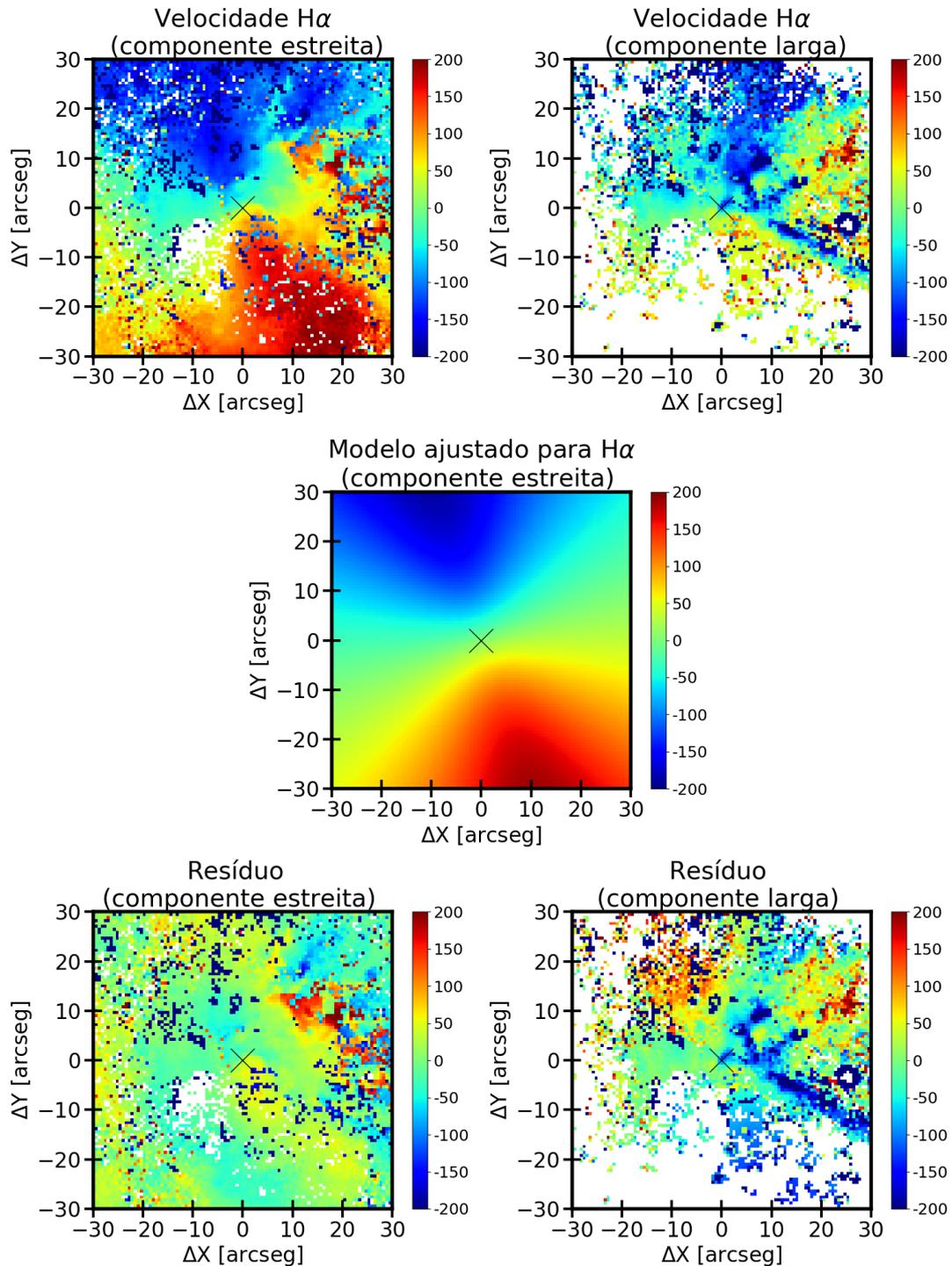
No painel superior encontra-se o mapa de velocidade da linha de absorção de Ca II (a esquerda) e o mapa do modelo ajustado (a direita). No painel inferior apresentamos o resíduo do ajuste. A velocidade para ambas as figuras está em  $\text{km s}^{-1}$ .

#### 4.5.2 Cinemática do gás

Aplicamos também o modelo de rotação da Equação 4.3 para a linha de emissão de  $\text{H}\alpha$  (componente estreita). Vale lembrar que após o ajuste de duas gaussianas para linha de  $\text{H}\alpha$  determinamos que a componente mais estreita está associada ao disco e a componente mais larga é produzida pelo *outflow*. Na Figura 4.10, temos o mapa de

velocidade para as componentes larga e estreita (painéis superiores), o mapa do melhor modelo de rotação ajustado à componente estreita (painel central) e os mapas de resíduos para as componentes estreita e larga (painéis inferiores) após a subtração do melhor modelo. Para o ajuste, encontramos  $v_{sys} = 0,6 \pm 0,7 \text{ km s}^{-1}$  (a velocidade sistêmica utilizada é  $434,1 \text{ km s}^{-1}$ );  $a = 246 \pm 4 \text{ km s}^{-1}$ ;  $\Psi_0 = 287,6^\circ \pm 0,4^\circ$ ;  $\theta = 61^\circ \pm 1^\circ$  e  $c_0 = 17'' \pm 1''$ . Nós fixamos  $p = 1,5$ . Ao analisarmos a componente estreita de  $\text{H}\alpha$  verificamos que os pontos que mais se afastam do modelo de rotação de um disco (ver o mapa de resíduos) são co-espaciais com o gás de alta ionização. Percebe-se que uma região significativa do gás, ao noroeste do AGN, possui resíduos com valores que chegam a  $200 \text{ km s}^{-1}$ . Atribuímos essa discrepância ao fato que o gás deve estar fora do plano galáctico, já que essa parcela de gás está associada ao cone de ionização. Comparando com os mapas de  $[\text{Fe VII}]$  é fácil constatar que os maiores resíduos estão associados à região do *outflow*. Em relação à componente larga de  $\text{H}\alpha$ , o mapa de resíduo apresenta claramente as bordas do cone de ionização, principalmente ao sudoeste do AGN. Encontramos velocidades em excesso de  $\simeq -150 \text{ km s}^{-1}$  em relação a velocidade do disco

Figura 4.10 - Cinemática do gás ionizado em Circinus.



No mapa superior, temos a velocidade da componente estreita de H $\alpha$  (à esquerda) e a componente larga (à direita). No mapa central temos o modelo de rotação ajustado. No painel inferior temos o resíduo do ajuste para componente estreita e larga. As velocidades das figuras estão em  $\text{km s}^{-1}$ .

Estudos do gás ionizado em Circinus realizados por Elmoultie et al. (1998) encontraram um eixo de rotação de  $292^\circ$ , um ângulo de inclinação de  $40^\circ \pm 10^\circ$ , e uma velocidade de rotação de  $350 \text{ km s}^{-1}$ . A diferença no valor do ângulo de inclinação obtido por Elmoultie et al. (1998) e os nossos resultados deve-se principalmente ao menor tamanho do campo utilizado no ajuste (de  $30'' \times 30''$ ). Os autores propõem que a galáxia hospedeira é moderadamente inclinada em relação ao observador.

Na Figura 4.11 são apresentados os resultados de rotação encontrado pelo ajuste, porém em uma projeção 3D para diferentes ângulos de um observador. Na imagem, o plano  $XY$  é equivalente ao da Figura 4.9. No eixo  $Z$ , temos os valores de velocidade. Os valores negativos encontram-se na parte superior e positivos na parte inferior. Dessa forma, estamos supondo que o observador está localizado sobre o eixo  $+Z$ , onde o plano  $XY$  da imagem é o plano do céu. Na projeção, a componente azul encontra-se projetada acima do plano  $Z = 0$  (simulando uma aproximação em relação ao observador) e a região vermelha para baixo (afastando do observador). Essa projeção 3D se mostra importante para uma melhor visualização da região do disco da galáxia, e da região onde a componente estelar possui velocidade de rotação próxima de zero. Essas mesmas projeções são também apresentadas na Figura 4.12, onde temos as componentes de velocidade de  $[\text{Fe VII}]$ . A Figura 4.13 mostra uma projeção 3D do modelo de rotação ajustado juntamente com as componentes de  $[\text{Fe VII}]$ . Nessas imagens fica evidente que o gás emissor de  $[\text{Fe VII}]$  possui movimentos não circulares. De fato, a projeção 3D indica que esse gás está fora do plano da galáxia.

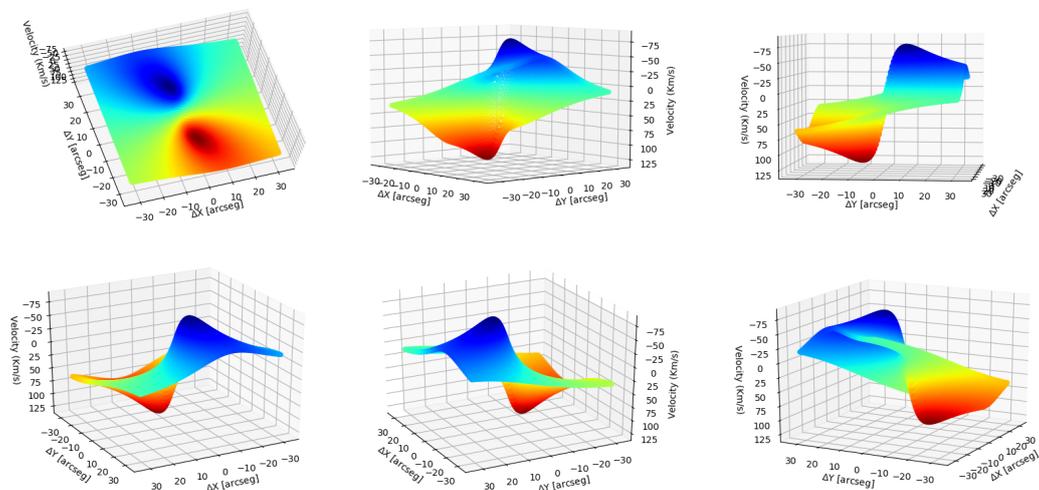
### 4.5.3 Mapas de canais das linhas de $\text{H}\alpha$ , $[\text{O III}]$ e $[\text{Fe VII}]$

Estudamos também a cinemática do gás através de mapas de canais derivados a partir dos perfis das linhas de emissão de  $\text{H}\alpha$ ,  $[\text{O III}]$  e  $[\text{Fe VII}]$ . Para isso, utilizamos dados do MUSE com a binagem original (ver seção 3), de modo a preservar a melhor amostragem angular possível (tamanho do spaxel de  $0,2''$ ).

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os mapas de canais para as linhas de  $\text{H}\alpha$  e  $[\text{O III}]$ , respectivamente, ambos com bins de  $\Delta\lambda = 1,25 \text{ \AA}$ . As regiões onde medimos um fluxo menor que  $1,5 \times \sigma_{sky}$  foram removidas do mapa. Adotamos aqui o termo  $\sigma_{sky}$  como o desvio padrão do ruído obtido para uma região de céu.

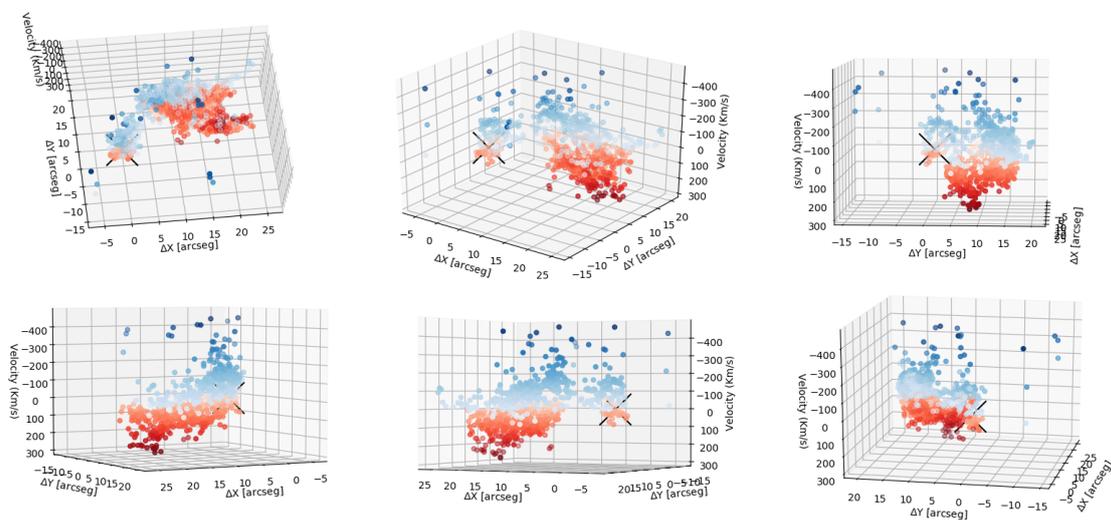
Percebe-se que  $\text{H}\alpha$  possui uma emissão mais estendida dentro do cone de ionização. Na direção noroeste o gás emissor possui velocidades que vão desde  $-375 \text{ km s}^{-1}$  até  $422 \text{ km s}^{-1}$ . Os mapas mostram a presença de vários filamentos na direção radial

Figura 4.11 - Mapa de velocidades em projeção 3D.



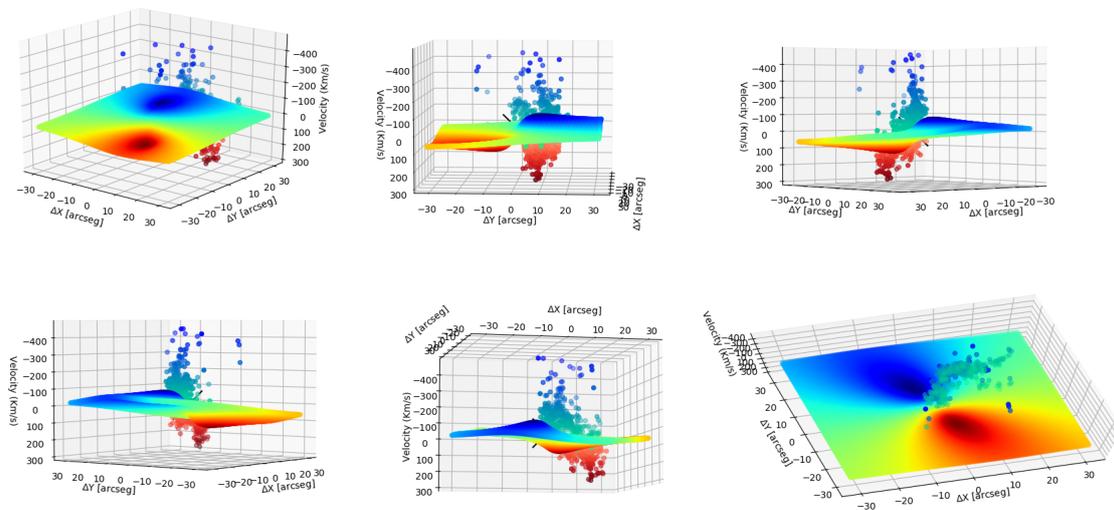
O plano do céu é apresentado na direção  $XY$  e a velocidade no eixo  $Z$ .

Figura 4.12 - Projeção 3D da emissão de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$ .



ao NO do núcleo e associados a essas estruturas, vários “*knots*” em emissão. O filamento mais evidente é detectado nos canais de velocidades  $-204 \text{ km s}^{-1}$ ,  $-147 \text{ km s}^{-1}$  e  $-90 \text{ km s}^{-1}$ . Esta estrutura acompanha a borda sul do cone de ionização. Um se-

Figura 4.13 - Modelo de rotação em projeção 3D em conjunto com a linha de emissão de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$ .



gundo filamento aparece bem proeminente nos canais de velocidade  $-33 \text{ km s}^{-1}$  e  $23 \text{ km s}^{-1}$  em um PA de  $\sim 305^\circ$ . A sua projeção em direção ao centro da galáxia parece indicar uma associação com o núcleo ativo. De fato, a emissão mais distante de  $[\text{Fe VII}]$  relatada acima coincide espacialmente com esta última estrutura linear.

Nos mapas de canais de  $\text{H}\alpha$  foi possível identificar 14 *knots*, marcados com círculos na Figura 4.14. Os *knots* são claramente visíveis nos canais de velocidade  $-90 \text{ km s}^{-1}$ ,  $-33 \text{ km s}^{-1}$ ,  $23 \text{ km s}^{-1}$  e  $80 \text{ km s}^{-1}$ , embora alguns deles apareçam nos mapas com velocidades de  $-375 \text{ km s}^{-1}$  e  $422 \text{ km s}^{-1}$ . Esses mesmos *knots* são também detectados em  $[\text{O III}]$ , como pode ser visto na Figura 4.15. Nesse último mapa, um dos *knots* é detectado com uma velocidade de  $-675 \text{ km s}^{-1}$ . A conexão entre os *knots* e os filamentos é ainda mais evidente nos mapas de canais de  $[\text{O III}]$ , principalmente no centro e nas bordas do cone. A estrutura filamentosa no cone, já visto em  $\text{H}\alpha$ , é realçada em  $[\text{O III}]$ , com pelo menos seis filamentos de emissão detectados nos mapas de canais, particularmente nas velocidades  $-2 \text{ km s}^{-1}$  e  $71 \text{ km s}^{-1}$ .

Alguns dos filamentos e *knots* aqui identificados já foram apresentados em Veilleux e Bland-Hawthorn (1997). Os autores relatam que o maior desses filamentos se estende por até  $40''$  ( $\sim 800 \text{ pc}$ ). Na Figura 4.15, detectamos esse mesmo filamento, muito próximo à borda oeste do campo do MUSE, coincidente com a emissão de  $[\text{Fe VII}]$  mais estendida observada neste trabalho. Além disso, o filamento que está alinhado ao eixo do jato rádio é detectado até  $\sim 1 \text{ kpc}$  do AGN.

A excelente sensibilidade do MUSE nos permitiu detectar um número maior de *knots*, chamados de “bullets” no trabalho de Veilleux e Bland-Hawthorn (1997). Eles identificaram quatro principais “knots” localizados a  $\sim 11''$ ,  $18''$ ,  $30''$  e  $37''$  do AGN, com uma PA de  $\sim 270^\circ$ . Além desses, aqui identificamos “knots” em uma região mais próxima do AGN, localizados a uma distância menor que  $10''$  em relação a centro da galáxia. Veilleux e Bland-Hawthorn (1997) sugerem que as velocidades do gás observadas no cone de ionização são altamente supersônicas. Nesse cenário, choques de alta velocidade ( $V > 100 \text{ km s}^{-1}$ ) poderiam explicar o surgimento dessas estruturas e, além disso, contribuiriam para a ionização do gás. Suporte adicional para este cenário vem da detecção de emissão de alta ionização em larga escala, preenchendo a região onde a maioria dos *knots* está localizada. O campo de velocidade dos *knots* e sua forte associação com os filamentos sugere que eles representam material expelido pelo núcleo ou arrastado por um vento alinhado ao eixo polar da galáxia.

Dados de emissão rádio disponíveis para Circinus apoiam a hipótese que o vento, se movimenta na direção do jato. Ainda, o cone de ionização a noroeste parece possuir um contra-cone em rádio nas bandas 13 e 20 cm (ELMOUTTIE et al., 1998) (ver Figura 4.16). Esta conclusão é tirada da comparação entre as Figuras 4.14 e 4.15 e os mapas de rádio. Não observamos o contra-cone em nenhuma das linhas estudadas porque o disco da galáxia na direção SE está de frente para o observador e oculta boa parte dessa estrutura em *outflow*.

Na Figura 4.17 apresentamos os mapas de canais para a linha de [Fe VII]. Identificamos que na região nuclear e circumnuclear ( $< 100 \text{ pc}$  do AGN) a linha apresenta sua máxima largura e é fortemente assimétrica para o azul, sendo observada desde o canal  $-543 \text{ km s}^{-1}$  até  $256 \text{ km s}^{-1}$ . Na emissão estendida ( $> 200 \text{ pc}$ ), o gás emissor de [Fe VII] se localiza ao noroeste do AGN, sendo visualizado nos canais de  $-297 \text{ km s}^{-1}$  até  $256 \text{ km s}^{-1}$  com clara emissão de duplo pico em várias regiões. Encontramos uma região centrada em  $X = 15 \text{ arcseg}$  e  $Y = 5 \text{ arcseg}$  que possui emissão desde o canal  $-420 \text{ km s}^{-1}$  até  $194 \text{ km s}^{-1}$ . Nesta, identificamos 4 componentes na linha de emissão de [O III] com velocidades desde  $\sim -900 \text{ km s}^{-1}$  até  $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$  (ver Figura 4.18). Os dados sugerem que essas quatro componentes podem estar associadas a uma nuvem de gás perfurada pela passagem de um antigo jato ou produzida por um jato em precessão. Esse possível jato seria também responsável pelos spots vistos nas emissões de  $\text{H}\alpha$  e [O III].

Figura 4.14 - Mapas de canais para linha de emissão  $H\alpha$ .

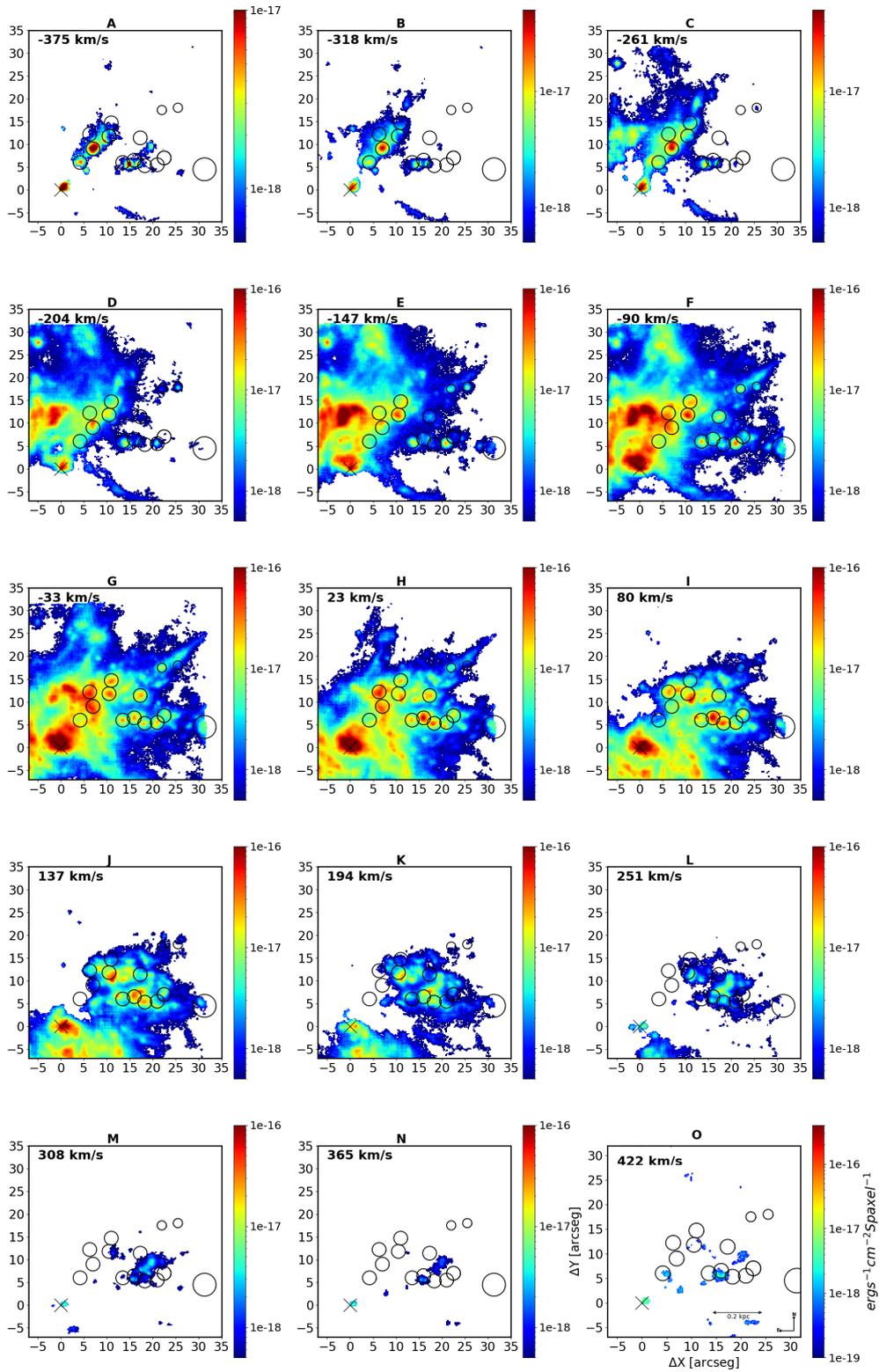


Figura 4.15 - Mapas de canais para linha de emissão [O III].

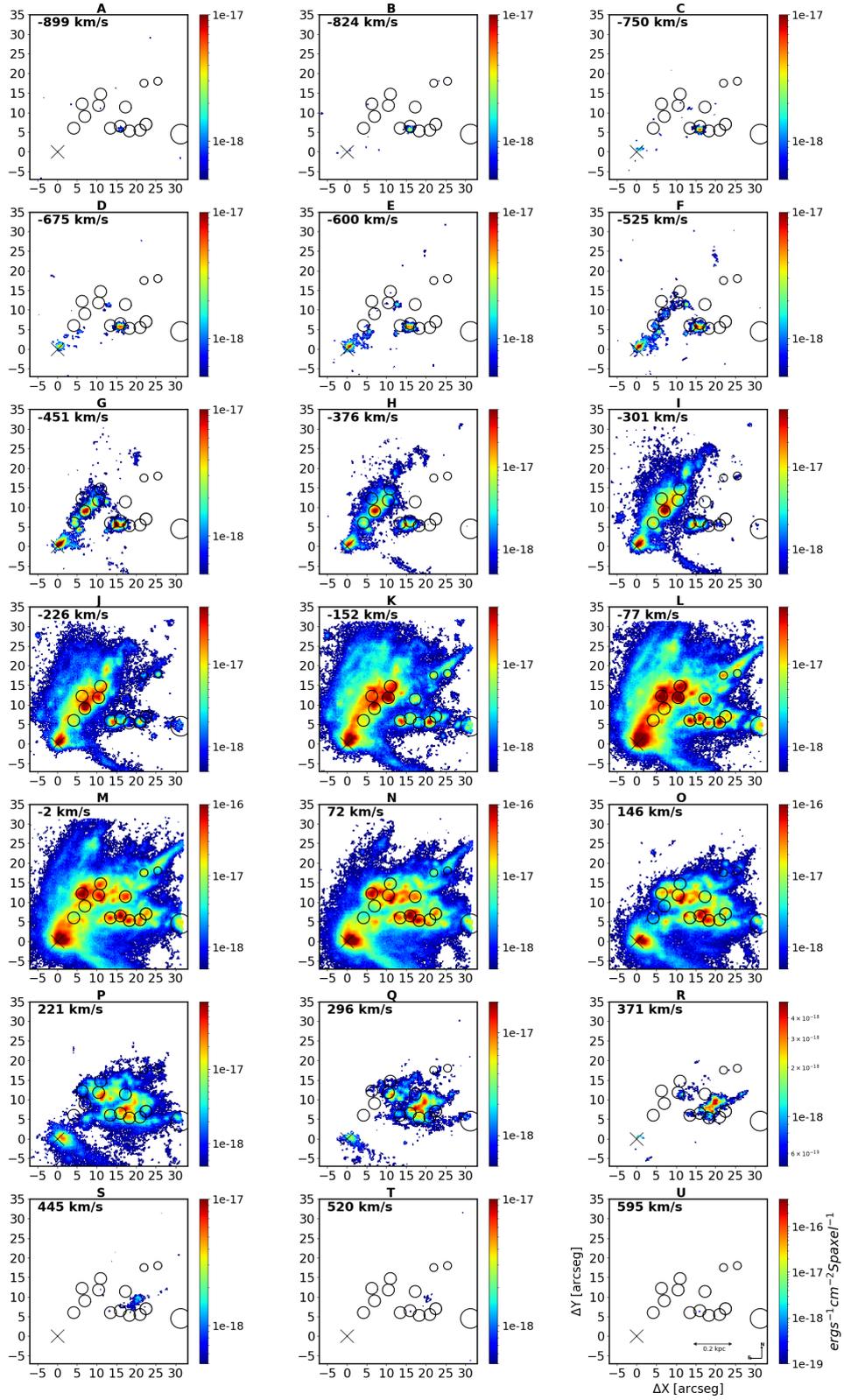
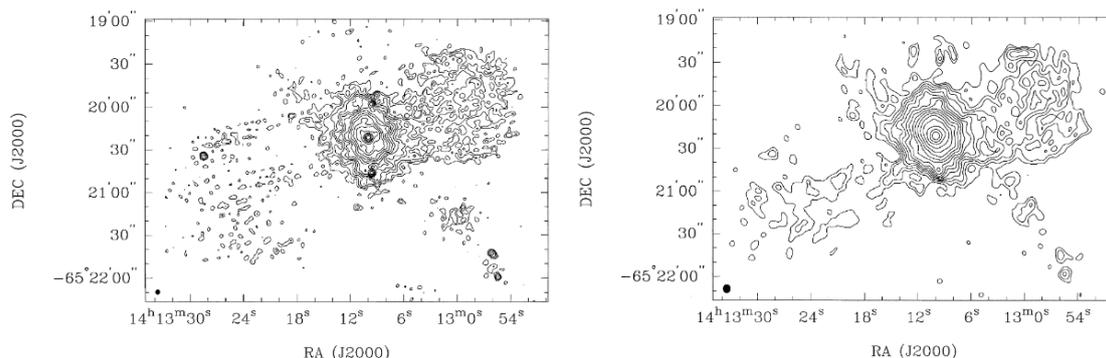


Figura 4.16 - Emissão rádio em Circinus.



No painel da esquerda encontra-se a emissão rádio em 13 cm. Os contornos estão em escalas de  $0,2 \text{ mJy beam}^{-1}$ . No painel da direita observamos o mapa rádio em 20 cm, com os contornos em escalas de  $0,3 \text{ mJy beam}^{-1}$ .

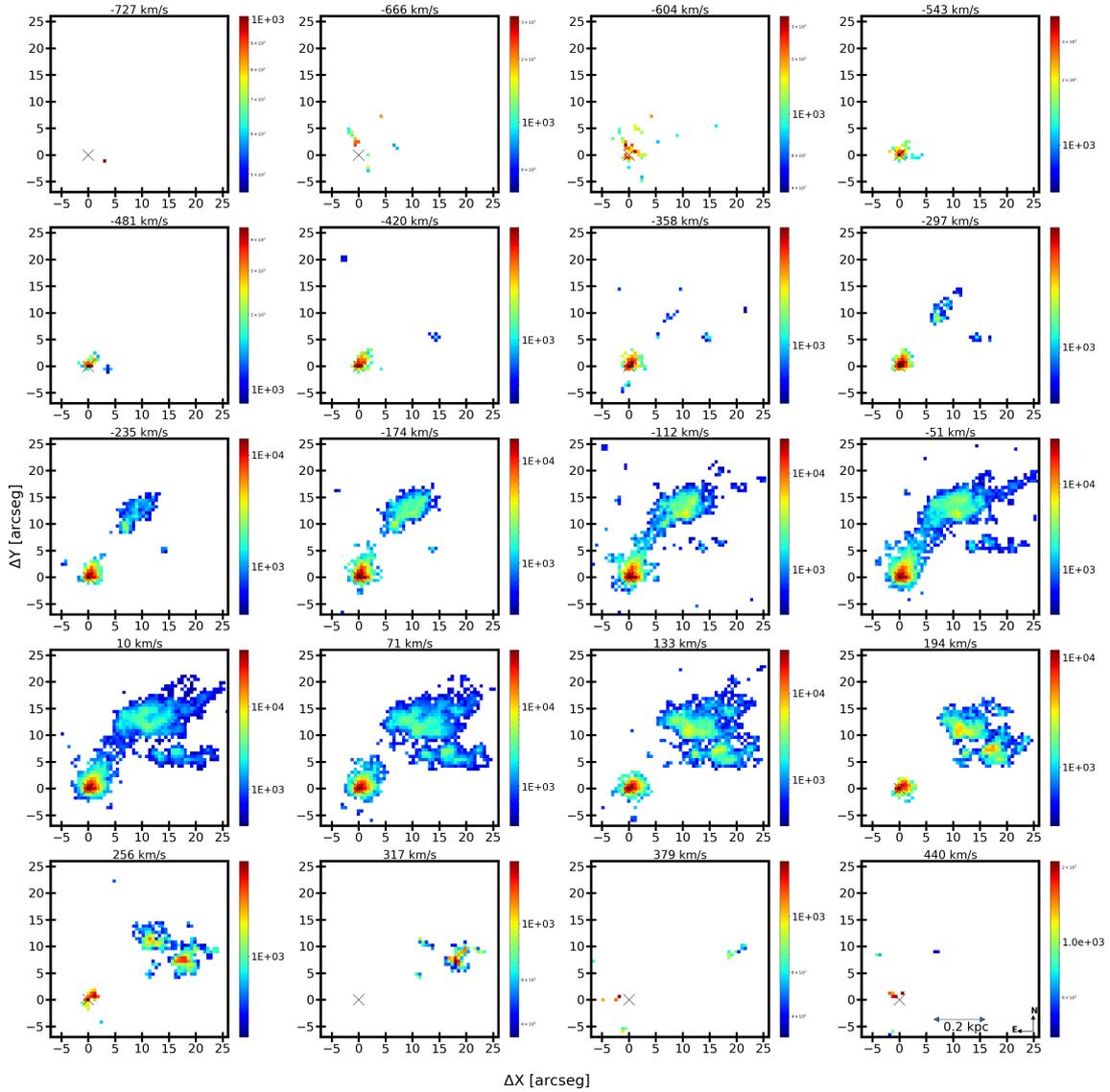
Fonte: Elmouttie et al. (1998).

#### 4.5.4 Componentes de linhas espectrais com alto deslocamento para o Azul.

Ao realizar uma varredura detalhada do cubo, foram encontradas duas componentes extras de velocidade que estão deslocadas para o azul nas linhas espectrais de  $[\text{O III}] \lambda 5007$ ,  $[\text{N II}] \lambda 6548$  e  $[\text{S II}] \lambda 6716$ . O gás emissor possui velocidades de  $\sim -500 \text{ km s}^{-1}$  e  $\sim -700 \text{ km s}^{-1}$ . Na Figura 4.18 são apresentadas as linhas de  $[\text{O III}] \lambda 5007$  (em azul),  $[\text{N II}] \lambda 6548$  (em vermelho) e  $[\text{S II}] \lambda 6716$  (em preto) em 4 spaxels diferentes. O eixo  $X$  está no espaço de velocidades. Os 8 painéis à direita do mapa estão distribuídos em duas colunas. Na coluna da esquerda, observamos as linhas acima descritas normalizadas em intensidade 1 nas quatro regiões A, B, C e D identificadas no mapa de emissão de  $[\text{Fe VII}]$  ao lado. Na coluna da direita, mostramos uma ampliação na escala de intensidade de cada região para observar em mais detalhe as componentes de alta velocidade.

Verificamos que o ponto B encontra-se fora da região do gás de  $[\text{Fe VII}]$ . Como previsto, não possui componentes de gás com velocidade menor que  $-400 \text{ km s}^{-1}$ . Já os pontos A, C e D apresentam componentes com velocidades de  $-400 \text{ km s}^{-1}$  e  $-750 \text{ km s}^{-1}$ . Ainda na Figura 4.18 são apresentados os ajustes obtidos para as 4 componentes de cada linha:  $[\text{O III}] \lambda 5007$ ,  $[\text{N II}] \lambda 6548 + \text{H}\alpha + [\text{N II}] \lambda 6583$  e  $[\text{S II}] \lambda 6716 + [\text{S II}] \lambda 6731$  para o spaxel da posição A do mapa. Em cada linha foram ajustadas 4 componentes, identificadas com as cores azul, verde, amarela e vermelha (nessa sequência) e logo abaixo, em vermelho, é apresentado o resíduo do ajuste.

Figura 4.17 - Mapas de canais para emissão coronal da galáxia Circinus.



Mapas de canais da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  em Circinus. A barra de fluxos está em unidades de  $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ .

A consistência do ajuste nas três linhas estudadas nas regiões que estão dentro do cone de ionização sugere que essas componentes adicionais são reais. O resultado dá suporte à hipótese da presença de gás de alta velocidade, com valores bem acima dos encontrados no disco estelar.

Para analisar em mais detalhes o *outflow* em Circinus, utilizamos a linha de  $[\text{O III}]$ . Na Figura 4.19 são apresentados os mapas de cada componente ajustada para  $[\text{O III}]$  desde que essa componente esteja a mais de  $70 \text{ km s}^{-1}$  da velocidade do disco no

spaxel correspondente, de acordo com o modelo de rotação ajustado. Dessa forma as componentes 1, 2, 3 e 4 representam respectivamente as componentes ajustadas em um intervalo de:  $-960 \text{ km s}^{-1}$  e  $-540 \text{ km s}^{-1}$  (componente 1),  $-540 \text{ km s}^{-1}$  e  $-330 \text{ km s}^{-1}$  (componente 2),  $-330 \text{ km s}^{-1}$  e  $90 \text{ km s}^{-1}$  (componente 3) e  $90 \text{ km s}^{-1}$  e  $340 \text{ km s}^{-1}$  (componente 4). Podemos verificar que a componente 3 está contornando as bordas do cone de ionização; as componentes 1 e 2 sinalizam uma estrutura de *outflow* deslocada para o azul com uma velocidade mínima de  $-750 \text{ km s}^{-1}$  e a componente vermelha sugere um *outflow* com velocidade de  $350 \text{ km s}^{-1}$ . Na Figura 4.20 apresentamos as 4 componentes sobrepostas, onde as cores azul e vermelha representam os contornos das componentes da linha de [Fe VII].

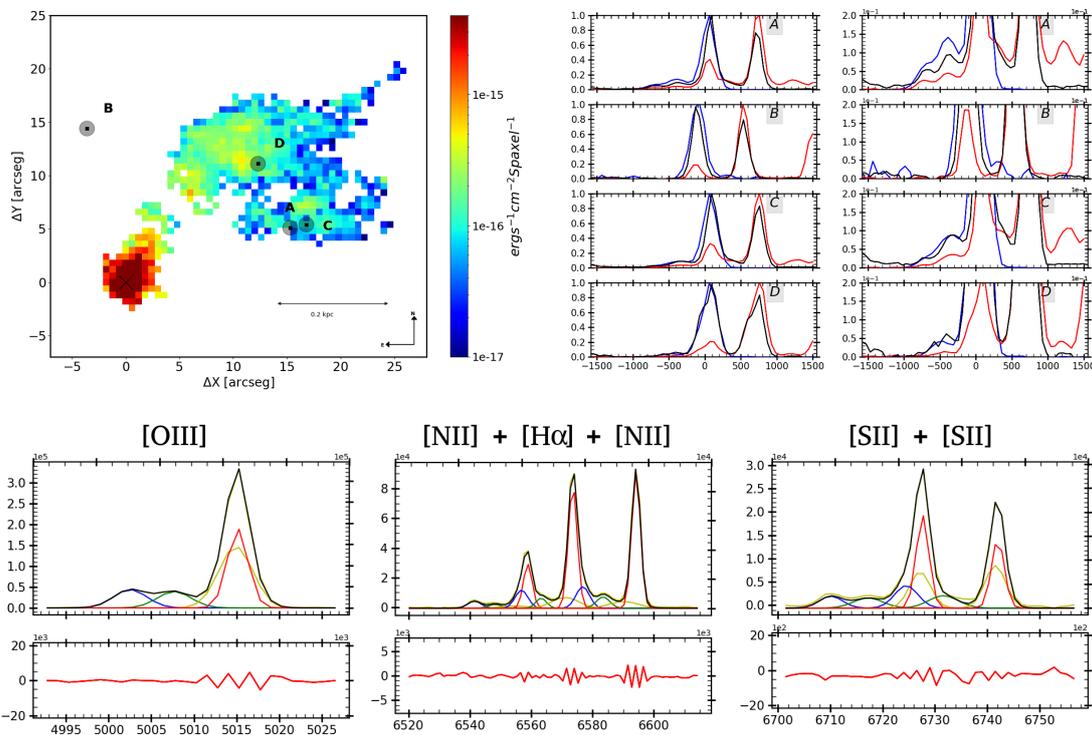
O mapa da Figura 4.20 sugere a presença de uma casca esférica em expansão, claramente visível na linha de [Fe VII]. Na Figura 4.21 apresentamos um modelo 3D com a possível configuração da casca esférica traçada pelas linhas de [O III] (apenas as componentes 1, 2 e 4 da Figura 4.19) e pelas componentes da linha de [Fe VII]. Os resultados sugerem uma casca com raio de 200 pc, se expandindo com uma velocidade de  $750 \text{ km s}^{-1}$ . Essa estrutura será utilizada na seção 4.6 para estimar a taxa e massa do *outflow*. As componentes com velocidades de  $\sim -700 \text{ km s}^{-1}$  e  $\sim -500 \text{ km s}^{-1}$  não foram identificadas na linha de [Fe VII] devido ao baixo sinal ruído, uma vez que essas componentes possuem um sinal dez vezes menor que as componentes principais (com velocidades entre  $-350 \text{ km s}^{-1}$  e  $+350 \text{ km s}^{-1}$ ).

#### 4.5.5 Momentos para as linhas de baixa e média ionização

Informação complementar sobre a cinemática do gás ionizado pode ser obtida através dos mapas de momentos (fluxo, velocidade, FWHM) para as linhas espectrais mais importantes. Na Figura 4.22 são apresentados ps mapas de momentos das linhas de baixa ionização  $H\alpha$ , [O I]  $\lambda 6300$ , [S II]  $\lambda 6716$  e [N II]  $\lambda 6583$ . Cada uma das linhas acima foi ajustada usando uma ou duas componentes gaussianas, sendo uma deslocada para a região azul do espectro (componente azul) e a outra deslocada para região vermelha do espectro (componente vermelha).

Os mapas de fluxos são apresentados na primeira coluna da Figura 4.22. Essas linhas são realçadas na região nuclear da galáxia (região central com raio de  $10''$  em volta do AGN). Elas traçam muito bem o anel de formação estelar em Circinus, que foi previamente relatado e estudado por outros autores (MARCONI et al., 1994; CURRAN et al., 1998). Pode-se destacar também que o gás de baixa ionização se estende praticamente em todas as direções ao redor do núcleo, incluindo as regiões norte e oeste do AGN. De fato, no cone de ionização esse gás preenche toda a região NO do

Figura 4.18 - Mapa de fluxos da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  após ajuste de 4 componentes gaussianas.

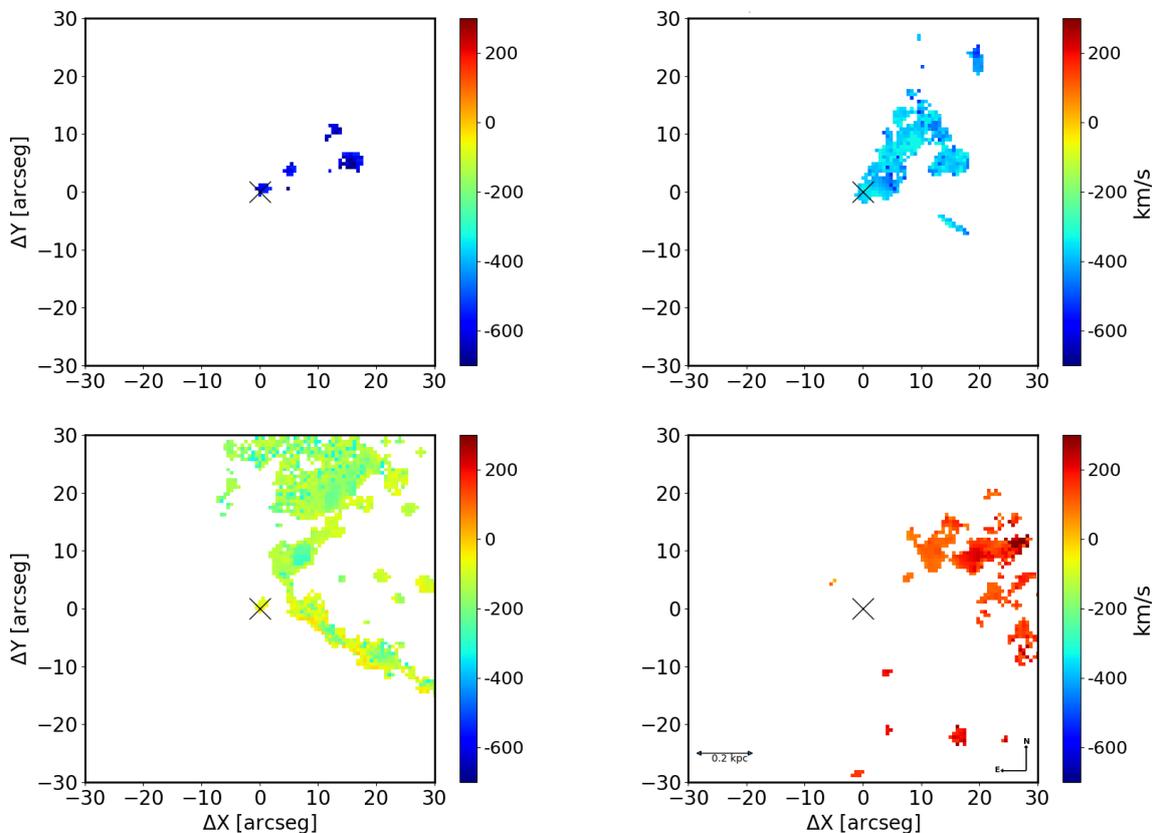


Mapa de fluxos da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  (mapa superior esquerdo) e ao lado direito os perfis de linha no espaço de velocidade de  $[\text{O III}] \lambda 5007$  (azul),  $[\text{N II}] \lambda 6548$  (vermelho) e  $[\text{S II}] \lambda 6716$  (preto). Todos os fluxos foram normalizados para uma melhor visualização. Nos painéis inferiores apresentamos as linhas de  $[\text{O III}] \lambda 5007$ ,  $[\text{N II}] \lambda 6548 + \text{H}\alpha + [\text{N II}] \lambda 6583$  e  $[\text{S II}] \lambda 6716 + [\text{S II}] \lambda 6731$  para o spaxel da posição A do mapa. Em para cada linha foram ajustadas 4 componentes, apresentadas nas cores azul, verde, amarela e vermelha (nessa sequência).

campo do MUSE.

A coluna central da Figura 4.22 apresenta o mapa de velocidades. Percebe-se que o gás de baixa ionização encontra-se em rotação, similar ao observado na linha de  $\text{H}\alpha$ . Ao noroeste vemos que parte do gás está fora do plano da galáxia, na região que coincide espacialmente com o *outflow* de alta ionização. Ainda, observamos que a componente azul dessas linhas traça o filamento já mencionado, associado à borda sul do cone de ionização. As velocidades típicas do gás estão entre  $-200 \text{ km s}^{-1}$  e  $-100 \text{ km s}^{-1}$ . Esses valores estão de acordo com os apresentados recentemente por [Mingozi et al. \(2019\)](#). O FWHM das linhas de baixa ionização atinge valores maiores que  $300 \text{ km s}^{-1}$ , principalmente na região mais central do cone de ionização.

Figura 4.19 - Mapa de velocidades em Circinus, separada em 4 componente da linha de [O III]  $\lambda 5007$ .



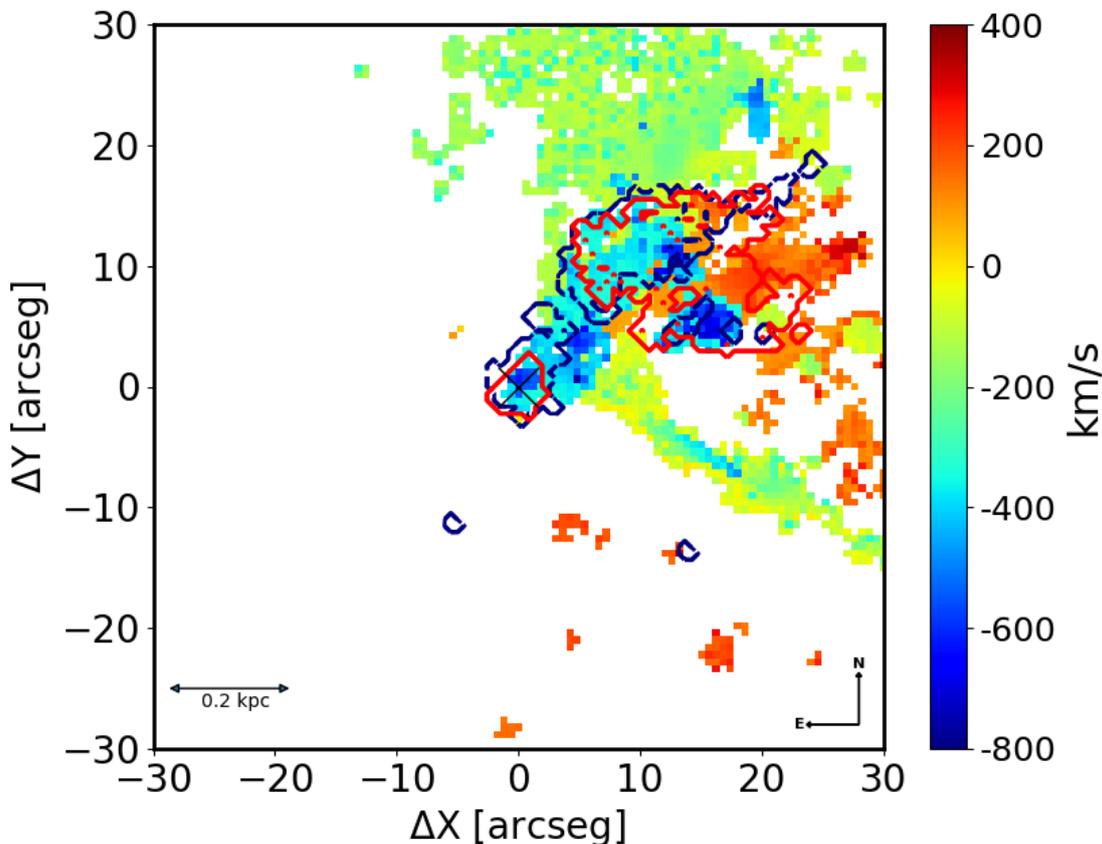
Mapas de velocidade para as componentes de [O III]  $\lambda 5007$ , com velocidades entre  $-960 \text{ km s}^{-1}$  e  $-540 \text{ km s}^{-1}$  (componente 1, painel superior à esquerda),  $-540 \text{ km s}^{-1}$  e  $-330 \text{ km s}^{-1}$  (componente 2, painel superior à direita),  $-330 \text{ km s}^{-1}$  e  $90 \text{ km s}^{-1}$  (componente 3, painel inferior à esquerda) e  $-150 \text{ km s}^{-1}$  e  $340 \text{ km s}^{-1}$  (componente 4, painel inferior à direita). As componentes entre  $-70 \text{ km s}^{-1}$  e  $+70 \text{ km s}^{-1}$  em relação a velocidade sistêmica não são apresentadas.

A Figura 4.23 apresenta os mapas de momentos para as componentes azuis e vermelhas das linhas de média ionização de [O III]  $\lambda 5007$ , He II  $\lambda 5412$ , [Ar III]  $\lambda 7136$  e [S III]  $\lambda 9069$ . Assim como na emissão de baixa ionização discutida acima, o anel de formação estelar é realçado por essas linhas, exceto em He II. Esta última emissão só é detectada na região nuclear e na porção de mais alta ionização no cone.

Observamos evidências de que parte do gás emissor de [O III], [Ar III] e [S III] está localizado no disco da galáxia. Essa conclusão vem da detecção de componentes azul e vermelha nessas linhas, assim como é visto em H $\alpha$ .

O gás de média ionização apresenta também um grande intervalo de velocidades (ver

Figura 4.20 - Mapa posição-velocidade para Circinus.



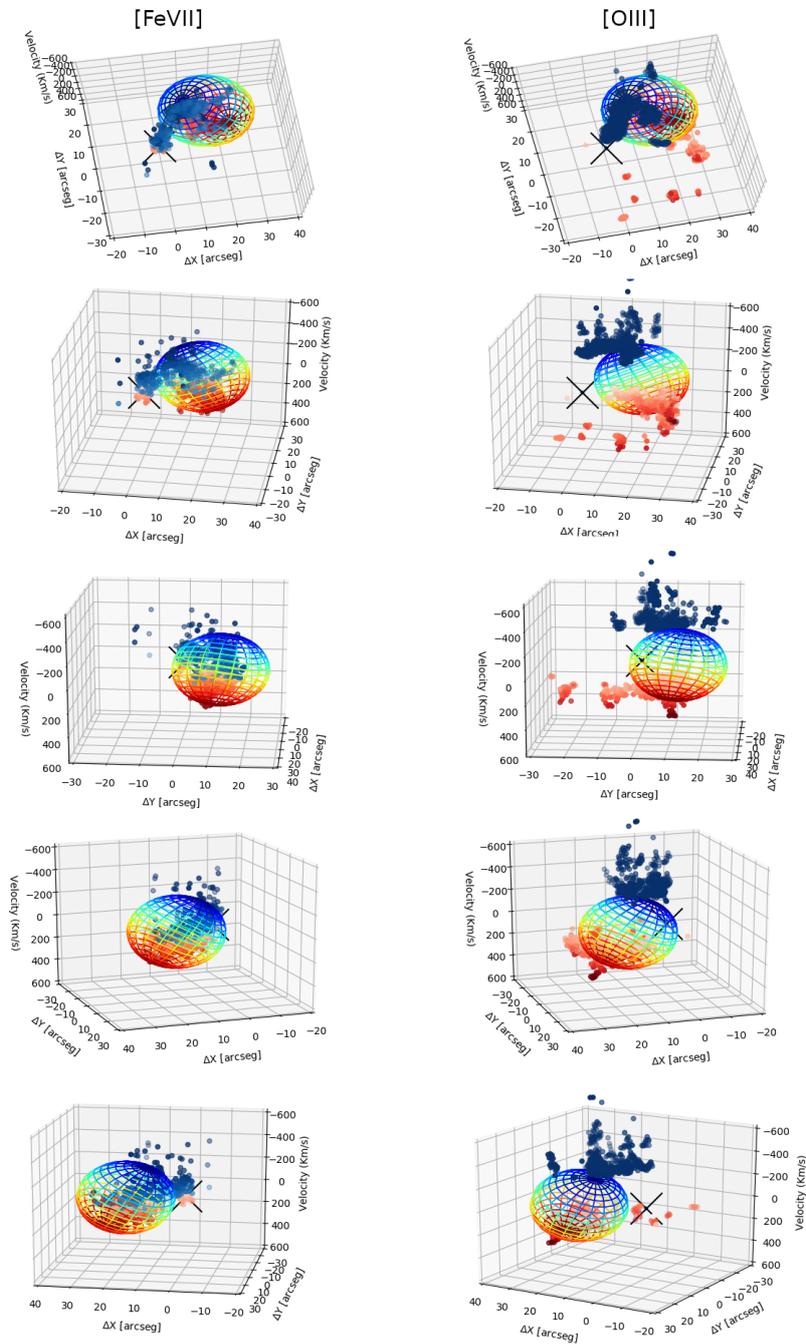
Mapa posição-velocidade com as quatro componentes de velocidade apresentadas na Figura 4.19, com contornos da componente azul de [Fe VII] (contornos em azul) e contornos da componente vermelha de [Fe VII] (contornos em vermelho).

na Figura 4.23). Por exemplo, pode-se verificar a existência de uma componente com valores de  $\text{FWHM} > 300 \text{ km s}^{-1}$ , na mesma região onde o gás se desvia fortemente do modelo de rotação. Isso evidencia que o gás localizado no cone de ionização, se encontra fora do plano da galáxia.

#### 4.5.6 Mapas de momentos para as linhas de alta ionização

Linhas de alta ionização (potencial de ionização  $> 54,2 \text{ eV}$ ), fornecem informação adicional da presença de *outflows* (RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2006). Sabe-se que as estrelas mais quentes (tipos O e B) possuem fótons com energia suficiente apenas para ionizar gás capaz de emitir He II. Linhas de alta ionização não são observadas em regiões fotoionizadas por estrelas. Portanto, a presença de tais linhas nos espectros de uma galáxia revela a existência de processos altamente energéticos, muito importantes para estudos de *outflows*, uma vez que a produção dessas linhas em

Figura 4.21 - Projeção 3D das componentes de velocidade de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  e  $[\text{O III}] \lambda 5007$ .



Projeção 3D das componentes de velocidade de  $[\text{Fe VII}]$  (a esquerda) e  $[\text{O III}]$  (a direita) juntamente com um modelo de casca esférica em expansão. As velocidades positivas encontram-se em vermelho e as velocidades negativas em azul.

AGNs deve-se à fotoionização pela fonte central ou devido a processos mecânicos tais como choques.

Figura 4.22 - Mapas de momentos para as linhas de baixa ionização,  $H\alpha$ ,  $[O\text{I}] \lambda 6300$ ,  $[S\text{II}] \lambda 6716$  e  $[N\text{II}] \lambda 6583$ .

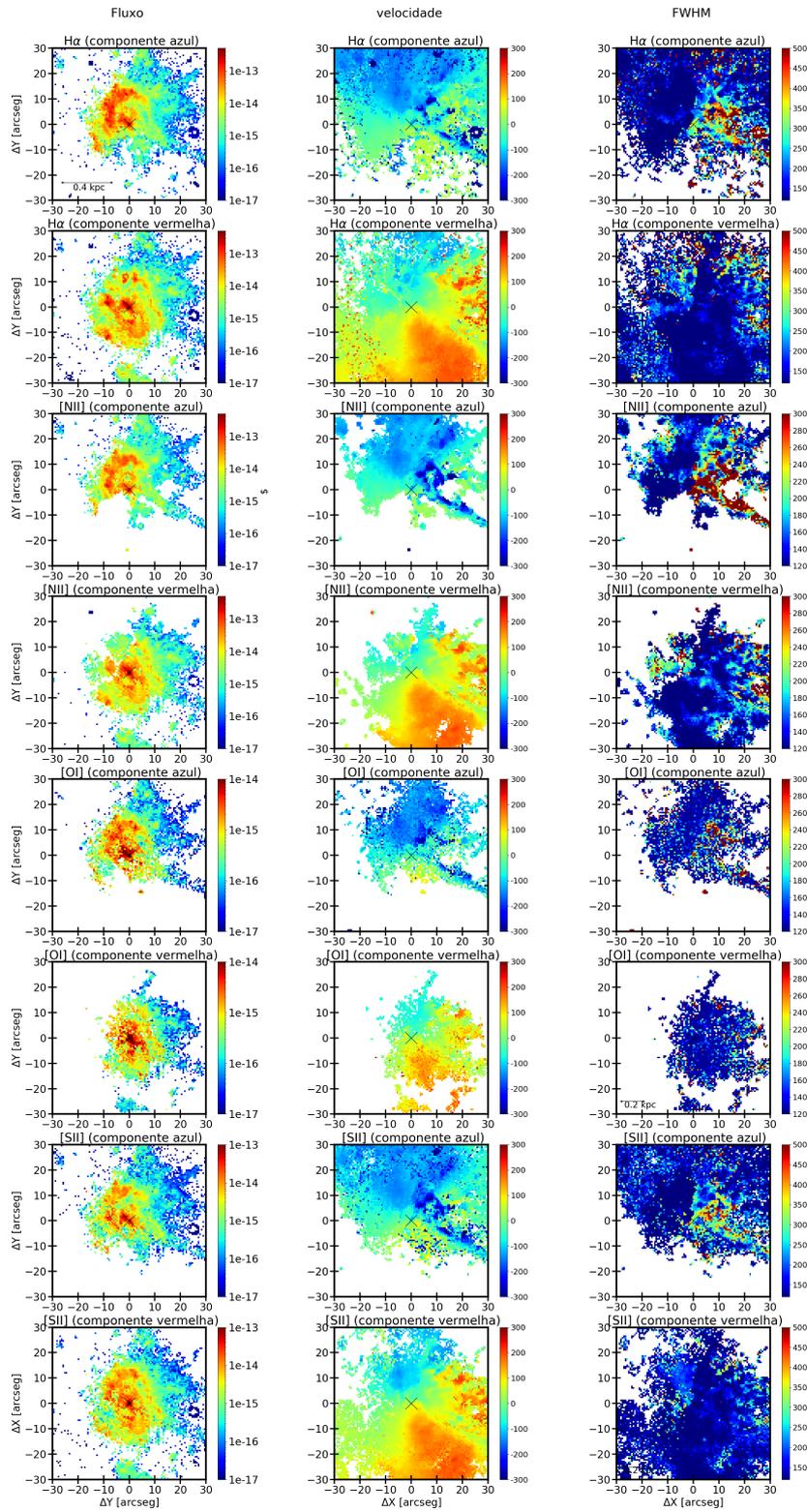
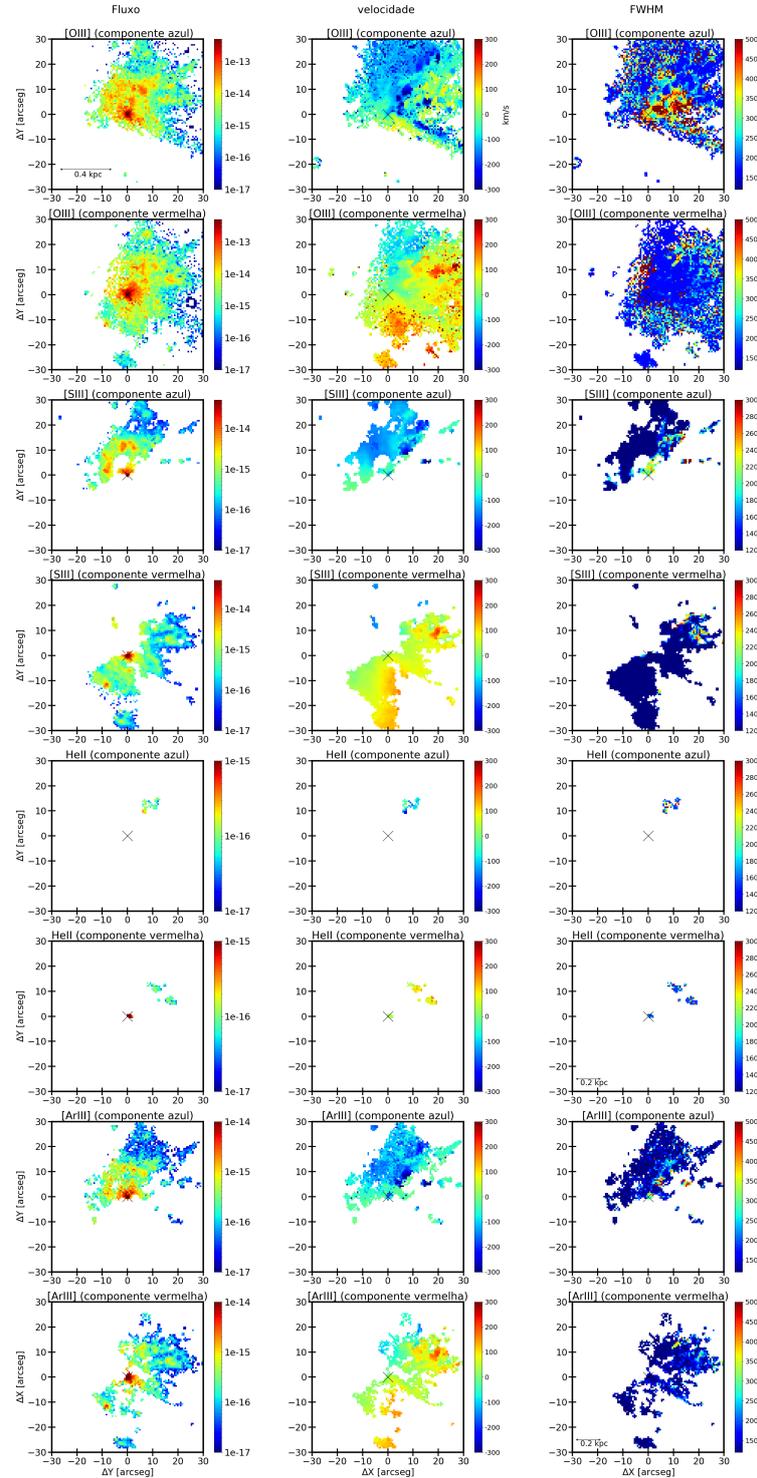


Figura 4.23 - Mapas de momentos para as linhas de: [O III]  $\lambda$ 5007, [S III]  $\lambda$ 9069, He II  $\lambda$ 5412 e [Ar III]  $\lambda$ 7136.



Estudamos as principais linhas de alta ionização detectadas no intervalo de comprimento de onda dos dados do MUSE (3750 até 9300 Å). Na Figura 4.24, apre-

sentamos os mapas de momentos das componentes azul e vermelha para as linhas de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  e  $[\text{Ar V}] \lambda 7006$ . Já na Figura 4.25 apresentamos os mapas de momentos para  $[\text{Fe X}] \lambda 6375$ . É possível identificar uma estrutura bem definida para a componente azul e vermelha da linha de  $[\text{Fe VII}]$ . Essa estrutura será estudada com detalhes na seção 4.6.

Nos mapas de alta ionização (Figuras 4.24 e 4.25) são identificadas duas regiões bem definidas: o núcleo e o cone de ionização. Nesses mapas não são observadas linhas coronais nas bordas do cone. As linhas são predominantemente encontradas na região mais interna do cone. Percebe-se que  $[\text{Fe X}]$  é detectada na região central do cone, com estrutura de duplo pico. A componente azul se mostra mais estendida na região central, detectada até 150 pc do AGN. A componente vermelha é mais compacta na região nuclear, porém possui uma estrutura maior na emissão mais estendida (localizada a distância  $> 200$  pc do AGN).

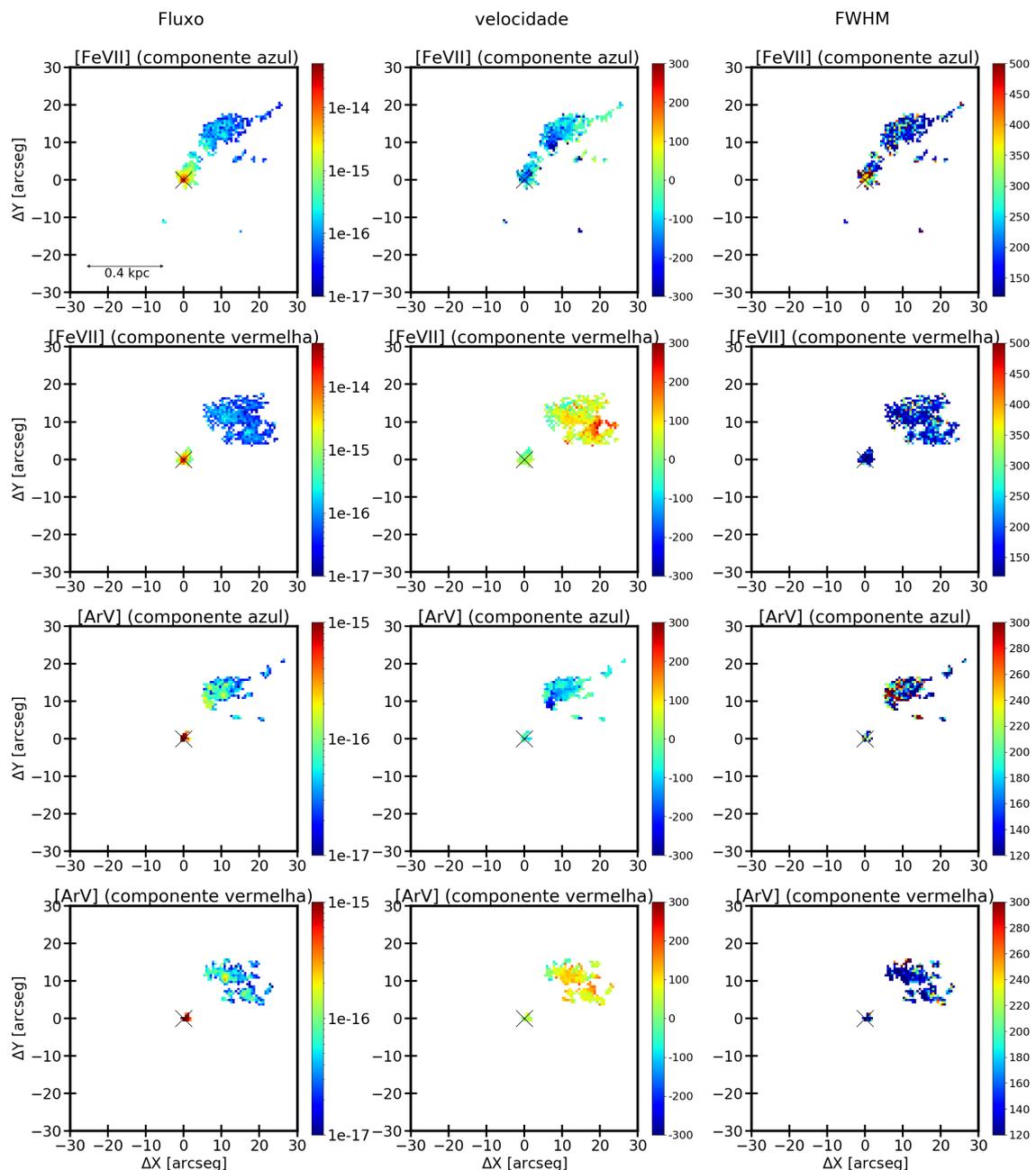
As três linhas coronais consideradas aqui não apresentam evidências de gás em rotação, confirmando resultados anteriores derivados das linhas de baixa e média ionização, no sentido de que a maior parte do gás ionizado no cone está fora do plano da galáxia. A detecção de perfis duplos de linhas encontradas na região central do cone apoiam esse cenário. Os dados sugerem bolhas de gás em expansão. Pela orientação do gás em relação ao núcleo e ao jato rádio-emissor, sugerimos que as bolhas são infladas pela passagem do jato através do ISM da galáxia.

A linha de  $[\text{Ar V}]$  na Figura 4.24 possui uma estrutura muito semelhante à da linha de  $[\text{Fe VII}]$  porém originada em uma região mais compacta. A emissão de  $[\text{Fe X}]$ , é produzida em uma nuvem com diâmetro de 60 pc, que pode ser vista principalmente pela componente vermelha da linha (ver Figura 4.25). Essa linha é consistente, em velocidade, FWHM e posição espacial, com a emissão mais intensa detectada em  $[\text{Fe VII}]$ .

#### 4.6 Cálculo da taxa de *outflow*

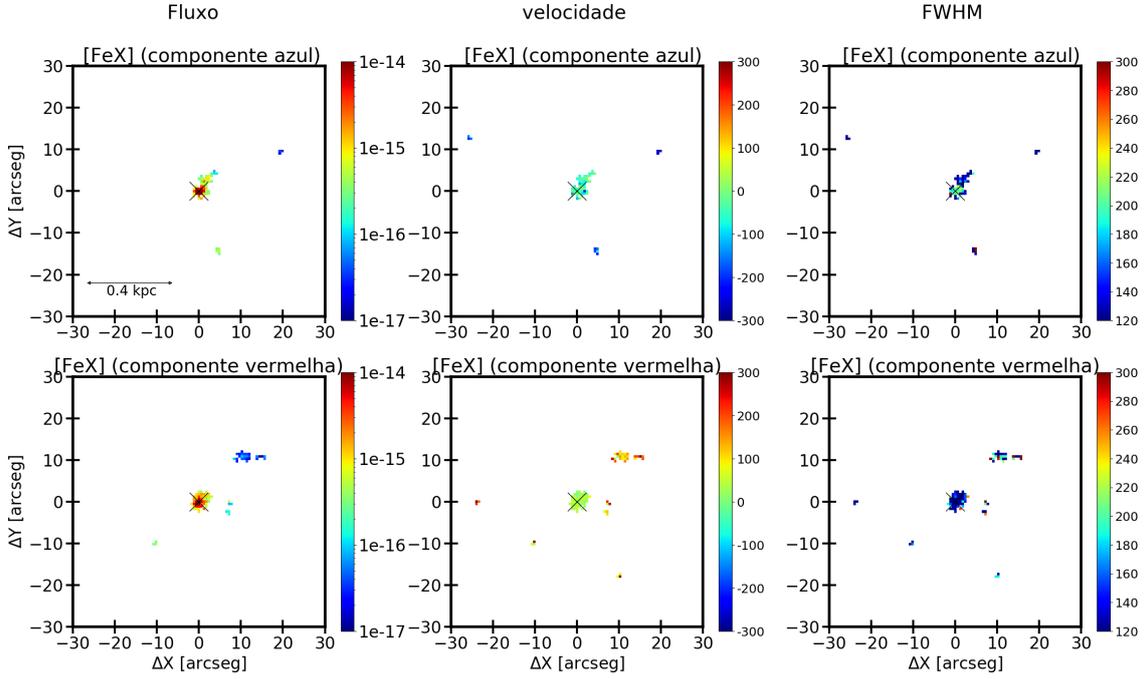
Estudos da massa e taxa de *outflows* são tradicionalmente realizados usando a linha de  $[\text{O III}]$ . Porém, pelo fato dela também ser produzida no disco da galáxia e em regiões de formação estelar, separar a contribuição de cada um desses processos e isolar somente a componente de *outflow* pode estar sujeito a grandes incertezas. Por exemplo, Mingozi et al. (2019) utilizou um critério de velocidade em  $[\text{O III}]$  onde componentes com valores menores que  $-150 \text{ km s}^{-1}$  e maiores que  $150 \text{ km s}^{-1}$  (em relação a velocidade sistêmica da galáxia) seriam contribuições das componentes do

Figura 4.24 - Mapa de momentos para as linhas de alta ionização [Fe VII]  $\lambda 6087$  e [Ar V]  $\lambda 7006$ .



*outflow*. Esse critério foi a base para a determinação da contribuição do *outflow* em Circinus. Porém, no mapa de velocidades da linha de [Fe VII]  $\lambda 6087$  encontramos gás em *outflow*, com velocidades com valores entre  $-150 \text{ km s}^{-1} < v < 150 \text{ km s}^{-1}$  na maior parte da região associada a essa componente. Como as linhas tanto de [O III] como de [Fe VII] emitidas no *outflow* devem concordar em velocidades em cada spaxel, boa parte da emissão de [O III] apresentada como componente de disco

Figura 4.25 - Mapa de momentos para as linhas de [Fe X]  $\lambda 6375$ .



por Mingozi et al. (2019) deve também ter contribuição do *outflow*.

Nesse sentido, o uso simultâneo da informação que ambas as linhas ([O III] e [Fe VII]) permite determinar de forma mais confiável qual componente de [O III] utilizar. Assim, para o cálculo da massa e da taxa do *outflow* em Circinus, assumimos que a contribuição de [O III] na região co-espacial com [Fe VII] deve ser totalmente devida ao *outflow*. Foi identificado que os fluxos das linhas de [O III], [S II], [N II] e  $H\alpha$  são 4 vezes maiores na região do *outflow*, traçado por [Fe VII], quando comparado as demais regiões externas. Sendo assim, o valor de fluxo de [O III], medido na região co-espacial de [Fe VII] possui aproximadamente 80% da sua intensidade devido ao *outflow*.

#### 4.6.1 Cálculo do *outflow* em um modelo de estrutura bicônica

Nesta determinação inicialmente foi gerada uma máscara na região co-espacial com o gás de alta ionização e realizado o cálculo da luminosidade da linha de [O III] nessa região. Seguimos a prescrição apresentada em Cano-Díaz et al. (2012) através da Equação 4.5.

$$M_{ion}^{out} = 5,3 \times 10^7 \frac{L_{44}([O III])}{n_e 10^{[O/H]}} (M_{\odot}) \quad (4.4)$$

A partir de um modelo simplificado de uma distribuição de *outflow* bicônico com raio  $R$  chegamos em uma taxa de *outflow* dada pela Equação 4.5.

$$\dot{M}_{ion}^{out} = 164 \frac{L_{44}([O III]) \nu_3}{n_e 10^{[O/H]} R_{\text{Kpc}}} (M_{\odot} \text{ano}^{-1}) \quad (4.5)$$

Na Equação acima,  $L_{44}([O III])$  é a luminosidade do *outflow* em unidades de  $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ ,  $n_e$  é a densidade eletrônica do gás em unidades de  $10^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\nu_3$  é a velocidade do *outflow* em unidades de  $10^3 \text{ km s}^{-1}$  e  $R_{\text{Kpc}}$  é o raio da região bicônica do *outflow* em unidade de quiloparsec.

Assim, a partir da máscara da região de [Fe VII], chegamos a um fluxo de [O III] para componente azul e vermelha de  $2,7 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Spaxel}^{-1}$  e  $2,4 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Spaxel}^{-1}$ , respectivamente. Esses valores se traduzem em uma luminosidade de  $1,5 \times 10^6 L_{\odot}$  (i.e.  $5,7 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ ) e  $1,3 \times 10^6 L_{\odot}$  (i.e.  $5,1 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ ). Encontramos assim uma taxa de *outflow* para componente azul e vermelha de  $0,12 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  e  $0,10 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente. A massa de gás resultante é  $10^4 M_{\odot}$  e  $9 \times 10^3 M_{\odot}$ , respectivamente.

#### 4.6.2 Cálculo do *outflow* a partir do fluxo de $H\beta$

Nessa seção, estimamos a massa e a taxa do *outflow* utilizando o fluxo de  $H\beta$ , seguindo o método apresentado em Santoro et al. (2018). Para um gás ionizado, a massa pode ser estimada pela Equação 4.6.

$$M_{gas} = \frac{L(H\beta) m_p}{n_e \alpha_{H\beta}^{eff} h \nu_{H\beta}} \quad (4.6)$$

onde  $L(H\beta)$  representa a luminosidade da linha de emissão  $H\beta$ ,  $m_p$  é a massa do próton ( $1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ),  $n_e$  é a densidade eletrônica do meio ( $\sim 300 \text{ cm}^{-3}$ ),  $\alpha_{H\beta}^{eff}$  é o coeficiente de recombinação efetivo para  $H\beta$ , ( $\alpha_{H\beta}^{eff} = 3,03 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ), para o caso B (OSTERBROCK; FERLAND, 2006). O termo  $h\nu_{H\beta}$  é a frequência da linha de  $H\beta$  ( $4861,3 \text{ \AA}$ ) e  $h$  é a constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ).

A taxa de *outflow* foi estimada utilizando a Equação 4.7. Maiores detalhes dos cálculos são apresentados em Rose et al. (2018).

$$\dot{M}_{gas} = \frac{L(H\beta)m_p\nu_{out}}{n_e\alpha_{H\beta}^{eff}h\nu_{H\beta}r} \quad (4.7)$$

Na Equação 4.7, o termo  $\nu_{out}$  representa a velocidade de expansão do *outflow* ( $\sim 750 \text{ km s}^{-1}$ ) e o termo  $r$  é o raio da casca de gás do *outflow* em expansão (200 parsec).

Logo, chegamos a um fluxo de  $H\beta$  para componente azul e vermelha de  $2,9 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Spaxel}^{-1}$  e  $2,4 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Spaxel}^{-1}$  respectivamente. O que resulta em uma luminosidade de:  $1,6 \times 10^5 L_\odot$  (i.e.  $6,1 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ ) e  $1,4 \times 10^5 L_\odot$  (i.e.  $5,1 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ ). Encontramos assim uma taxa de *outflow* para componente azul e vermelha de  $0,05 M_\odot \text{ ano}^{-1}$  e  $0,04 M_\odot \text{ ano}^{-1}$ . Encontramos também uma massa do gás no valor de  $1,4 \times 10^4 M_\odot$  e  $1,2 \times 10^4 M_\odot$ .

#### 4.6.3 Estimativa do fluxo de $H\beta$ a partir de uma fonte central.

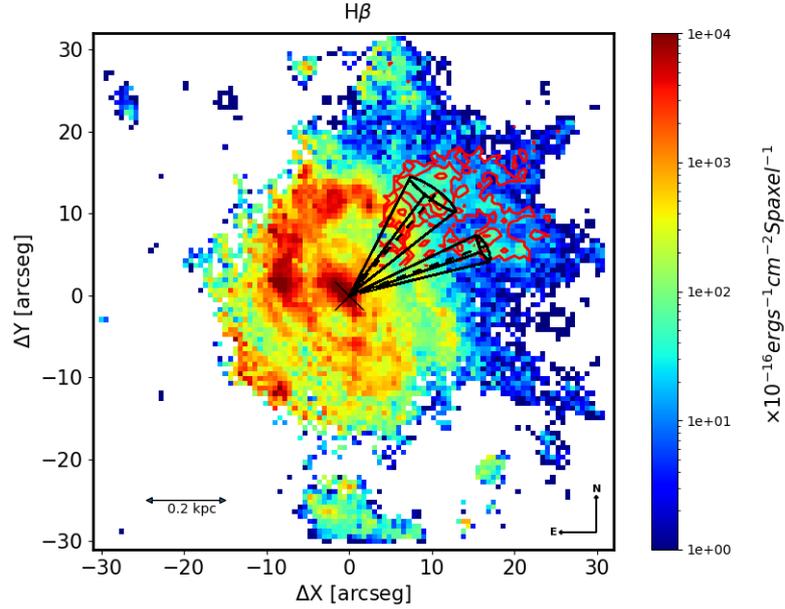
Com o intuito de verificar a existência de possíveis processos de choques na região de emissão de gás coronal realizamos os cálculos para a previsão do fluxo da linha de emissão de  $H\beta$ , supondo que ocorre apenas fotoionização pela fonte central. Para isso, integramos duas regiões em um ângulo sólido como mostrado na Figura 4.26. No caso de fotoionização apenas pelo AGN, podemos fazer uma estimativa da luminosidade prevista pelo AGN. Cálculo semelhante pode ser visto em Solórzano-Iñarrea e Tadhunter (2003).

A luminosidade em AGN de Circinus é  $10^{10} L_\odot$  (MOORWOOD et al., 1996). As regiões ao norte e ao sul do *outflow* de alta ionização estão em um ângulo sólido em relação ao núcleo de respectivamente  $0,013 \text{ sr}$  e  $0,003 \text{ sr}$ , o que representa uma proporção de  $1,27 \times 10^{-3}$  de toda luminosidade do AGN.

A luminosidade de  $H\beta$  a partir da ionização de um AGN pode ser estimada pela Equação 4.8 (ver Osterbrock e Ferland (2006)).

$$L(H\beta) = h\nu_{H\beta}\eta_e^2 fV\alpha_{H\beta}^{eff} \quad (4.8)$$

Figura 4.26 - Projeção dos ângulos sólidos utilizados para estimar o fluxo de  $H\beta$ .



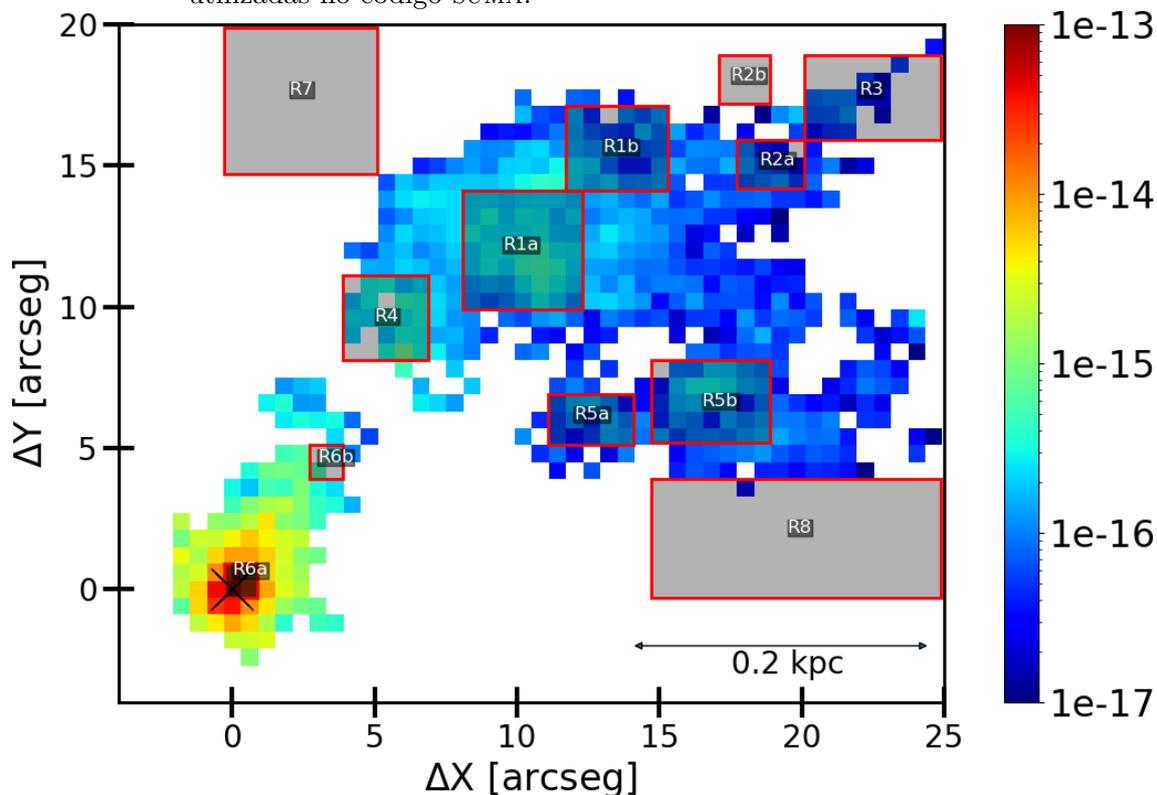
Mapa de fluxos para linha de  $H\beta$  com contornos da região do HIG traçado pela linha  $[Fe\ VII] \lambda 6087$ , em preto temos também a representação dos dois ângulos sólidos utilizados para estimar o fluxo de  $H\beta$ .

Onde  $h$  é a constante de Planck,  $\nu_{H\beta}$  é a frequência de  $H\beta$ ,  $\eta_e$  a densidade eletrônica,  $V$  o volume emitido na região,  $f$  é o *filling factor* e  $\alpha_{H\beta}^{eff}$  é o coeficiente de recombinação. O coeficiente efetivo para o caso B se relaciona com o coeficiente  $\alpha_{eff}$  na forma ( $\alpha_{eff}/\alpha_{\beta} = 0,117$ , ver Osterbrock (1989)). Assim, levando em conta um fator de cobertura para Circinus de 5%, temos uma luminosidade para a região de gás de alta ionização de no máximo de  $7,4 \times 10^4 L_{\odot}$ . Ao calcularmos a luminosidade para região do HIG encontramos uma luminosidade de  $H\beta$  de  $4,9 \times 10^5 L_{\odot}$ , ou seja, estamos encontrando a mesma ordem de magnitude que esperava-se em uma fotoionização apenas pelo AGN. Isso indica que deve existir um mecanismo adicional à fotoionização pela fonte central. Esse resultado dá suporte à hipótese de choques como principal mecanismo de ionização na região do *outflow*.

#### 4.7 Modelando as razões de linhas

Nas seções anteriores, encontramos fortes evidências de um jato rádio interagindo com o gás do cone de ionização em Circinus, principalmente pela cinemática peculiar do gás emissor de  $[Fe\ VII]$  e  $[O\ III]$ . O comportamento observado sugere a presença de gás chocado, localizado principalmente nas regiões de alta ionização detectadas a

Figura 4.27 - Mapa da linha de emissão de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  e os contornos das doze regiões utilizadas no código SUMA.



A barra de cores encontra-se em unidades de  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{spaxel}^{-1}$ .

mais de 200 pc do núcleo. Dessa forma, nesta seção, estudamos em detalhe a provável contribuição de choques na emissão da linha coronal observada no cone de ionização de Circinus.

Na Figura 4.6 percebe-se que existe um aumento da ionização do gás à medida que nos afastamos radialmente do AGN. Esse incremento está concentrado preferencialmente no centro do cone de ionização ao longo do cone de ionização. Visando estudar em mais detalhes a fonte de ionização de gás estendido em Circinus, foram selecionadas 11 regiões localizadas dentro do cone de ionização. Dentre essas regiões, 7 possuem forte emissão de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  e de  $[\text{O III}] \lambda 5007$ . A Figura 4.27 apresenta as 11 regiões selecionadas marcadas com caixas vermelhas, mais a região R6a, localizada no núcleo de Circinus.

Na primeira coluna da Tabela 4.1, listamos as linhas que serão utilizados na análise da fonte de ionização do gás. Na segunda, encontramos o comprimento de onda e

Tabela 4.1 - Potencial de ionização para diferentes íons.

linha	$\lambda(\text{\AA})$	IP (eV)
[Ar X]	5533	422,4
[Fe X]	6375	235,0
[Fe VII]	6087	99,0
[Ar V]	7006	59,8
[O III]	5007	35,1
He II	5412	54,4
[Ar III]	7136	27,6
[O II]	7320	13,6
[S III]	9069	23,3
[N II]	6583	14,5
He I	6678	24,6
[S II]	6716	10,4
[O I]	6300	0,0

na terceira, o potencial de ionização (IP, do inglês ionization potential) necessário para criar o íon que emite a linha correspondente.

Na Figura 4.27 são apresentadas 4 regiões caracterizadas por linhas de alta ionização: R1a, R5b, R6a e R6b. Verificamos que  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  é relativamente forte na região R1a, com aumento no seu fluxo na direção noroeste (regiões R1b, R2a e R3). As razões  $[\text{Ar III}] / \text{H}\beta$ ,  $[\text{O III}] / \text{H}\beta$ , e  $[\text{S III}] / \text{H}\beta$  possuem valores com comportamento semelhante, isto é, os spaxels das regiões mais distantes do AGN possuem razões com valores maiores do que nas regiões mais próximas do AGN (ver Figura 4.6).

Os mapas de  $[\text{N II}] / \text{H}\beta$  e  $[\text{S II}] / \text{H}\beta$  indicam uma região “jet-driven” em R3, devido aos baixos valores das razões, principalmente quando envolve íons de baixo potencial de ionização. Na região R6 as razões  $[\text{Fe X}] / \text{H}\beta$  e  $[\text{O III}] / \text{H}\beta$  diminuem no sentido R6a para R6b. A razão  $[\text{O III}] / \text{H}\beta$  possui uma estrutura fragmentada, provavelmente dependendo da densidade crítica relativamente baixa para des-excitação colisional.

A região R8 apresenta apenas linhas com baixo nível de ionização, vistas nos mapas de:  $[\text{O I}] / \text{H}\beta$ ,  $[\text{S II}] / \text{H}\beta$  e  $[\text{O II}] / \text{H}\beta$ . Porém,  $[\text{O II}] / \text{H}\beta$  desaparece ao norte, mas  $[\text{S II}] / \text{H}\beta$  e  $[\text{O II}] / \text{H}\beta$  são observadas nessa região. As regiões R7 e R8 mostram característica de meio interestelar.

Nas Tabelas A.1 até A.12, são listados os valores de FWHM médio (coluna 2) e máximo (coluna 4) medidos em cada região da Figura 4.6. Percebe-se uma grande dispersão entre os valores de FWHM, o que pode ser resultado da contribuição de

diversas nuvens com diferentes condições físicas. Com o objetivo de reproduzir as razões de linhas encontradas em cada região utilizamos o código SUMA, que aplica o efeito acoplado do choque e fotoionização pela fonte central. O código e os parâmetros de entrada foram brevemente descritos na seção 4.7.1.

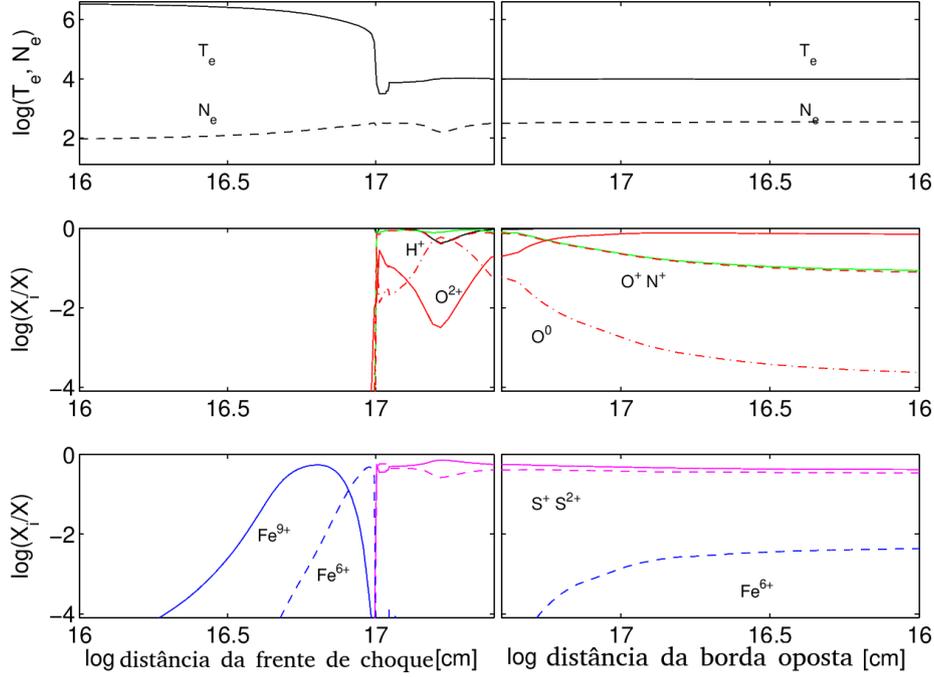
Valores relativamente altos de  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  e  $[\text{O I}] / \text{H}\beta$  dificilmente podem ser reproduzidos por um único modelo. Por isso, optamos pela elaboração de modelos representativos. Um primeiro é dominado por choque (SD, Shock Dominated), sendo esse o caso onde o contínuo ionizante do AGN que ilumina a nuvem é zero. O segundo modelo é dominado pela radiação (RD, Radiation Dominated), onde assumimos que a radiação da fonte central é dominante, embora choques estejam presentes. Não se espera um ajuste perfeito para todas as linhas nas diferentes regiões, já que muitas condições físicas coexistem. Os modelos RD são limitados por radiação. Portanto, são adaptados para reproduzir todas as razões de linhas dos espectros, exceto linhas com altos níveis de ionização. De fato, temperaturas relativamente altas do gás emissor de linha de alta ionização  $[\text{Fe VII}]$  e  $[\text{Fe X}]$  aparecem na região próxima da frente de choque. A temperatura a jusante diminui ao longo das nuvens gasosas seguindo a taxa de resfriamento que produz a recombinação de gás.

Em uma grande parcela de gás, a temperatura é mantida  $\geq 10^4$  K por efeito da radiação do AGN e pela radiação secundária. Portanto, as linhas de níveis de ionização médio e baixo (por exemplo,  $\text{H}\beta$ ) são fortes e as razões  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  e  $[\text{Fe X}] / \text{H}\beta$  calculadas são baixas em comparação com as observadas. Por outro lado, valores altos de  $[\text{Fe X}] / \text{H}\beta$ ,  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$ ,  $[\text{Ar X}] / \text{H}\beta$  e  $[\text{Ar V}] / \text{H}\beta$  são melhor reproduzidas pelos modelos SD limitados por matéria. Como exemplo, mostramos nas Figuras 4.28 e 4.29 os perfis de temperatura eletrônica, densidade eletrônica e abundâncias de íons mais significativos, ao longo de um modelo de nuvens RD e SD (ver Tabelas 4.2 e 4.3) ejetadas pelos *outflows* do núcleo ativo.

Na Figura 4.28, a nebulosa é dividida em duas metades. A frente de choque está no lado esquerdo do painel esquerdo, enquanto a borda alcançada pelo fluxo de ionização da fonte central está no lado direito do painel direito, em oposição à frente de choque.

No painel direito da Figura 4.28, a escala do eixo  $X$  é logarítmica e invertida, mostrando com a mesma precisão as condições físicas nas duas bordas da nuvem. Os lados SD e RD da nebulosa emissora são interligados por radiação secundária produzida pelas fatias de gás aquecidas pelo choque. Isso conduz a uma grande zona de gás a  $T \sim 10^4$  K. Nas nuvens dominadas por choques (ver Figura 4.29),

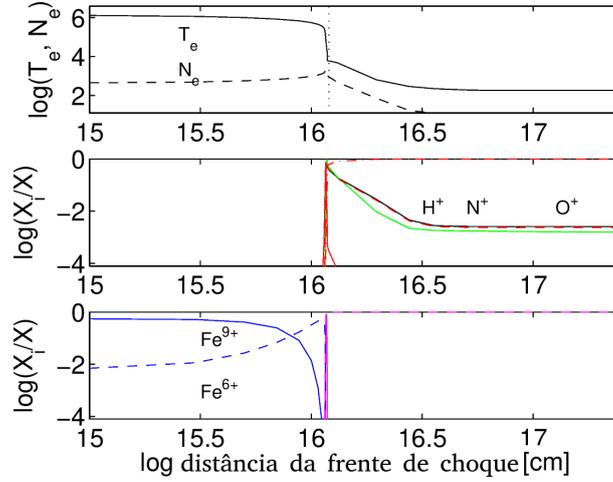
Figura 4.28 - Os perfis de  $T_e$ ,  $n_e$ , e a abundância dos íons mais significativos ao longo das nuvens na região R1a calculados por um modelo RD.



a borda interna oposta à frente de choque mostra a região recombinada do gás frio. A região a jusante em toda a nuvem é interrompida antes da recombinação de íons de alto nível de ionização tais como como  $\text{Fe}^{6+}$  e  $\text{Fe}^{9+}$ , para evitar uma forte intensidade de linha de  $\text{H}\beta$ , o que poderia reduzir o  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  e outras razões de linhas de alta ionização. Além disso, um modelo de choque puro limitado por radiação produziria razões de  $[\text{O II}] / \text{H}\beta$  relativamente altas. No painel superior da Figura 4.29, foi marcada uma linha vertical pontilhada na posição da frente de choque no qual os cálculos para o modelo mSD1b são realizados. A escolha da velocidade de choque em modelos SD é restringida pelas razões de linhas observadas em  $[\text{Fe VII}] / [\text{Fe X}]$  e  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$ .

Alguns elementos (por exemplo, S e N) podem ser depletados da fase gasosa porque estão presos em grãos de poeira e em moléculas. Os grãos são pulverizados em toda a frente do choque e à jusante, dependendo da velocidade do choque. Portanto, a abundância dos elementos pesados pode mudar de modelo para modelo. Para os outros elementos (He, C, O, Ne, Mg, Si, Ar, Cl e Fe), abundâncias solares em relação a H (ASPLUND et al., 2009) foram adotados.

Figura 4.29 - Os perfis de  $T_e$ ,  $n_e$ , e a abundância dos íons mais significativos ao longo das nuvens na região R1b calculados por um modelo SD.



#### 4.7.1 Detalhes dos cálculos do SUMA

Os principais parâmetros de entrada adotados para modelar as 12 regiões marcadas na Figura 4.27 são aqueles que levam ao melhor ajuste para o cálculo das razões de linhas do contínuo em emissão. Na Seção 3.6 foi realizada uma descrição sobre o funcionamento do código SUMA. Dedicaremos o restante deste capítulo aos resultados obtidos pela modelagem e suas principais implicações.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as razões de linhas observadas para cada região estudada em Circinus. Em cada linha da tabela marcada com sufixo (obs) listam-se as razões de linhas observadas. Os melhores resultados para os modelos RD e SD são apresentados na segunda e terceira linha, respectivamente. Na quarta linha temos a soma ponderada das razões de linhas. Os modelos foram restringidos às razões de linhas  $[O\ III] / H\beta$ ,  $[Fe\ VII] / H\beta$ ,  $[N\ II] / H\beta$ ,  $[S\ II] / H\beta$  e  $[O\ II] / H\beta$ .

Os parâmetros de entrada dos modelos estão listados na Tabela 4.3. Na última coluna dessa tabela, os fluxos de  $H\beta$  calculados na nebulosa ( $H\beta_c$ ) são apresentados. Pode-se derivar os fluxos das linhas a partir das razões de linhas, e adicionar as contribuições dos modelos RD e SD em cada região levando em conta os pesos relativos. A partir da divisão do fluxo total calculado para cada linha pela soma ponderada de  $H\beta_c$ , podemos obter o resultado final para cada razão de linha que é comparada com os dados observados na Tabela 4.2. Nas últimas duas linhas das Tabelas 4.4 e 4.5, apresentamos os fluxos totais das linhas em relação a  $H\beta$  calculado na nebulosa e os pesos relativos  $w$  adotados para somar os resultados dos modelos

RD e SD. Verificamos que os espectros R2b e R4 são reproduzidos apenas pelo modelo RD. Os resultados obtidos pela modelagem dos dados de observação nas diferentes regiões são comentados a seguir:

1) Na Tabela 4.2 verificamos que para todas as regiões observadas,  $[\text{Fe VII}] / [\text{Fe X}] > 1$ . Os resultados do modelo mostram que essa restrição é alcançada quando  $V_s \leq 550 \text{ km s}^{-1}$ . O ajuste bem realizado para  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  confirma nossa hipótese de que os modelos SD são limitados por radiação, uma vez que as linhas  $[\text{Fe X}]$  são mais fracas e raramente observadas.

2) São adotados diferentes pesos relativos em diferentes regiões (ver Tabelas 4.4 e 4.5) para somar as contribuições da nuvem SD e RD. Nas regiões R1a e R6a, a razão  $[\text{Ar X}] \lambda 5533 / \text{H}\beta$  é maior por um fator  $> 100$  quando comparada as outras regiões. Existem velocidades relativamente altas observadas no perfil da linha de  $[\text{Ar X}]$ . Note, porém, que esta linha pode estar combinada com  $[\text{Cl III}] \lambda 5539$ . Podemos observar que  $[\text{Cl III}] / \text{H}\beta$  resulta em 0,02 e 0,025 nas regiões R1a e R6a, respectivamente.

3) Em relação à densidade pré-choque, encontramos que os modelos RD são limitados pelas razões de linha  $[\text{O II}] \lambda 7320 / \text{H}\beta$  que são  $\leq 0,1$  em todas as regiões observadas. Este valor é reproduzido usando nuvens com densidades relativamente baixas,  $20 - 60 \text{ cm}^{-3}$ . Nas Tabelas 4.4 e 4.5,  $T_e$  e  $n_e$  em cada região são calculados a partir da média dos dados observados relatados na Tabela 4.2. Pode-se ver que  $n_e$  é aproximadamente proporcional a  $n_0$  para os resultados do modelo RD, lembrando que na região à jusante através das nuvens o gás é comprimido por fatores de 5 a 10, dependendo da velocidade do choque e do campo magnético.

Os modelos SD são menos limitados pela escolha de  $n_0$  porque em modelos limitados por matéria a razão de linha  $[\text{O II}] \lambda 7320 / \text{H}\beta$  é sempre  $< 1$ . As densidades de pré-choque adotadas neste trabalho concordam com aquelas obtidas pelos ajustes dos espectros da galáxia Circinus observados por Contini et al. (1998).

4) Reproduzimos as razões das linhas de O, Ar e Fe em relação a  $\text{H}\beta$ , utilizando abundâncias solares em relação a H ( $6,6 \times 10^{-4}$ ;  $3,27 \times 10^{-6}$  e  $3,2 \times 10^{-5}$ , respectivamente). A abundância relativa solar N/H ( $10^{-4}$ ) foi alterada por fatores de 0,4 a 1,8; isso foi realizado com a intenção de melhorar o ajuste das razões de linhas correspondentes. As abundâncias relativas S/H foram encontradas abaixo da solar ( $2 \times 10^{-5}$ ) em todas as regiões observadas, devido à presença de poeira.

5) Os fluxos de  $\text{H}\beta_c$  calculados pelos modelos SD, são menores por fatores entre

Tabela 4.2 - Comparação dos cálculos das razões de linhas em relação a  $H\beta$  com a média dos valores observados nas diferentes regiões.

Region	[O II] 5007	[Ar X] 5533	[Fe VII] 6087	[O I] 6300	[S III] 6312	[Fe X] 6375	$H\alpha$ 6563	[N II] 6583	[S II] 6717	[Ar V] 7006	[Ar III] 7136	[O III] 7320	[S III] 9069
R1a (obs)	10,31	0,02	0,12	0,23	0,04	0,02	3,10	2,13	0,63	0,07	0,27	0,06	0,45
mRD1a	10,0	3e-4	0,022	0,1	0,03	0,005	2,92	2,	0,76	0,007	0,3	0,09	0,6
mSD1a	11,	0,03	13,3	0,0	0,002	0,9	4,2	0,003	0,0	0,9	0,02	0,03	0,0
mR1a	10,	5,e-4	0,11	0,1	0,03	0,01	2,93	2,	0,75	0,013	0,3	0,09	0,59
R1b (obs)	8,8	-	0,22	0,12	0,03	-	3,1	1,32	0,47	0,07	0,2	0,06	0,35
mRD1b	9,3	3,e-4	0,024	0,1	0,02	0,006	2,9	1,8	0,5	0,006	0,35	0,1	0,4
mSD1b	7,5	6,4e-4	15,6	0,0	6,e-4	0,014	4,9	0,001	0,0	1,2	0,011	0,01	0,002
mR1b	9,27	3,e-4	0,24	0,1	0,02	0,006	2,93	1,8	0,5	0,02	0,34	0,1	0,4
R2a (obs)	8,97	-	0,22	0,07	-	-	3,23	0,87	0,34	0,09	0,21	-	0,37
mRD2a	9,	3e-5	0,027	0,05	0,028	6e-5	2,92	0,80	0,43	0,004	0,37	0,1	0,6
mSD2a	7,65	0,09	12,3	1,e-5	0,002	2,	3,9	0,005	5e-5	0,07	0,012	0,02	0,02
mR2a	8,97	0,0014	0,22	0,05	0,027	0,03	2,94	0,79	0,42	0,005	0,36	0,1	0,06
R2b (obs)	3,97	-	-	0,17	-	-	3,09	1,1	0,60	-	0,19	0,37	-
mRD2b	4,2	1,3e-5	0,017	0,2	0,007	3,e-6	2,97	1,2	0,63	0,003	0,18	0,27	0,46
R3 (obs)	10,96	-	0,22	0,13	-	-	3,38	0,97	0,37	0,09	0,21	0,14	0,32
mRD3	10,1	6,5e-5	0,05	0,01	0,04	1,e-4	2,97	0,9	0,3	0,01	0,38	0,13	0,9
mSD3	11,	0,03	13,3	0,0	0,02	0,9	4,2	0,003	0,0	0,94	0,013	0,034	0,0
mR3	10,1	4,e-4	0,22	0,01	0,04	0,01	2,98	0,9	0,3	0,02	0,37	0,128	0,89
R4 (obs)	6,88	-	0,03	0,2	0,02	-	3,11	2,45	0,79	0,02	0,114	0,05	0,22
mRD4	6,97	4e-5	0,03	0,05	0,03	0,0	2,93	2,2	0,54	0,003	0,3	0,09	0,9
R5a (obs)	10,12	-	0,08	0,32	0,04	-	3,10	3,25	0,93	0,04	0,25	0,11	0,50
mRD5a	9,4	1e-4	0,02	0,24	0,03	0,001	2,9	2,6	1,0	0,005	0,3	0,11	0,6
mSD5a	11,	0,03	13,3	0,0	0,002	0,9	4,2	0,003	0,0	0,94	0,02	0,034	0,0
mR5a	9,4	2,4e-4	0,082	0,24	0,03	0,005	2,9	2,6	1,	0,009	0,3	0,11	0,6
R5b (obs)	11,49	-	0,09	0,20	0,04	0,01	3,12	2,47	0,7	0,04	0,3	0,06	0,58
mRD5b	11,0	3e-6	0,044	0,01	0,04	0,006	2,93	2,	0,3	0,01	0,33	0,06	0,9
mSD5b	11,0	0,03	13,3	0,0	0,002	0,9	4,2	0,003	0,0	0,94	0,02	0,034	0,0
mR5b	11,	1e-4	0,09	0,01	0,04	0,01	2,93	2,	0,3	0,013	0,33	0,06	0,89
R6a (obs)	11,5	0,04	0,15	0,62	0,03	0,13	3,12	3,37	0,92	0,03	0,25	0,11	0,44
mRD6a	11,0	3e-4	0,02	0,4	0,035	0,005	2,92	2,2	0,94	0,007	0,35	0,1	0,7
mSD6a	11,0	0,03	13,3	0,0	0,002	0,9	4,2	0,003	0,0	0,94	0,02	0,034	0,0
mR6a	11,	6,e-4	0,16	0,4	0,034	0,014	2,94	2,2	0,93	0,02	0,35	0,1	0,69
R6b (obs)	7,6	-	0,06	0,46	0,02	0,02	3,11	4,02	1,31	-	0,18	0,09	0,21
mRD6b	7,42	1,2e-4	0,02	0,34	0,02	0,002	2,94	3,6	1,16	0,003	0,28	0,12	0,5
mSD6b	7,5	6,e-4	15,6	0,0	6,e-4	0,014	4,9	0,002	0,0	1,26	0,011	0,015	0,002
mR6b	7,42	1,2e-4	0,051	0,34	0,02	0,002	2,94	3,6	1,16	0,006	0,28	0,12	0,5
R7 (obs)	5,48	-	-	0,43	-	-	3,8	3,93	1,63	-	0,16	0,09	0,25
mRD7	5,6	3e-4	0,023	0,4	0,02	0,005	2,95	3,6	1,3	0,003	0,25	0,09	0,4
mSD7	5,7	0,14	11,8	0,0	9e-4	3,0	3,9	2,2e-3	3,3e-5	0,67	0,09	0,07	0,003
mR7	5,6	8,e-4	0,06	0,4	0,02	0,02	2,96	3,6	1,3	0,005	0,25	0,09	0,4
R8 (obs)	6,66	-	0,09	0,59	-	-	3,74	5,28	2,04	-	0,26	0,19	0,40
mRD8	6,3	1,3e-4	0,023	0,64	0,02	0,002	2,96	4,7	1,2	0,004	0,23	0,18	0,4
mSD8	6,	0,04	12,8	0,0	6e-4	1,2	4,	0,003	2,4e-5	0,7	0,09	0,01	0,005
mR8	6,3	2,e-4	0,09	0,64	0,02	0,008	3,	4,7	1,2	0,007	0,23	0,18	0,40

$< 10$  e  $> 100$  do que para modelos RD. Isso se deve aos modelos SD serem limitados por matéria. A alta fragmentação das nuvens pode ser explicadas pela turbulência criada por choques nas frentes de choque.

6) O fluxo de fotoionização do núcleo ativo é relativamente baixo em todas as regiões observadas, semelhante ao  $F$  encontrado para Liners. Em particular, diminui nas regiões externas R7 e R8.

#### 4.8 Discussão para galáxia Circinus

Nesse Capítulo foram apresentadas evidências não ambíguas do *outflows* de Circinus, mapeados usando linhas de alta-ionização. Pela primeira vez na literatura, detectamos nesse AGN emissão coronal de [Fe VII], até 700 pc do AGN. Ainda, encontramos emissão estendida de [Fe X] até 408 pc da fonte central. Foi verificado também que o gás de alta ionização está localizado em uma região de muita turbulência, com velocidades de até  $500 \text{ km s}^{-1}$ , produzido por gás a altas temperaturas

Tabela 4.3 - Parâmetros de entrada dos modelos para cada uma das regiões analisadas.

	$V_s$ km s <sup>-1</sup>	$n_0$ cm <sup>-3</sup>	$D$ pc	$F$ units <sup>2</sup>	N/H 10 <sup>-4</sup>	S/H 10 <sup>-4</sup>	$H\beta c^1$ erg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
mRD1a	500	20	0,14	2,0	1,0	0,12	3,3e-3
mSD1a	270	180	0,0015	-	1,0	0,10	2,6e-5
mRD1b	500	20	0,13	1,7	1,0	0,08	3,3e-3
mSD1b	280	200	0,0005	-	1,0	0,10	1,9e-5
mRD2a	200	40	0,05	1,2	0,4	0,10	1,8e-3
mSD2a	300	100	0,004	-	1,0	0,12	1,8e-5
mRD2b	180	60	0,03	1,2	0,4	0,06	2,7e-3
mRD3	200	45	0,023	1,3	0,8	0,15	1,0e-3
mSD3	270	180	0,0015	-	1,0	0,10	2,6e-5
mRD4	200	40	0,043	1,0	1,0	0,13	1,1e-3
mRD5a	260	41	0,067	2,7	1,4	0,13	4,4e-3
mSD5a	270	180	0,0015	-	1,0	0,10	2,6e-5
mRD5b	300	30	0,05	1,5	1,8	0,16	1,5e-3
mSD5b	270	180	0,0015	-	1,0	0,10	2,6e-5
mRD6a	550	20	0,17	2,7	1,0	0,13	4,8e-3
mSD6a	270	180	0,0015	-	1,0	0,10	2,6e-5
mRD6b	280	38	0,067	2,0	1,0	0,12	3,8e-3
mSD6b	280	200	0,0005	-	1,0	0,10	1,9e-5
mRD7	350	20	0,17	0,86	1,0	0,13	2,e-3
mSD7	350	20	0,03	-	1,0	0,13	3,6e-6
mRD8	250	20	0,26	0,7	1,3	0,10	1,4e-3
mSD8	250	20	0,04	-	1,3	0,10	2,3e-6

<sup>1</sup>  $H\beta$  calculado na nebulosa; <sup>2</sup> em 10<sup>9</sup> fótons cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> eV<sup>-1</sup> no limite de Lyman.

Tabela 4.4 - Valores médios de  $T_e$  e  $n_e$ ,  $H\beta_{tot}$  e pesos  $w$  são calculados para as regiões R1a, R1b, R2a, R2b, R3 e R4, modeladas com SUMA.

	R1a	R1b	R2a	R2b	R3	R4
$T_e$ (K) <sup>1</sup>	118884	10750	-	-	-	12692
$n_e$ (cm <sup>-3</sup> ) <sup>2</sup>	190	136	179	100	406	100
$H\beta_{tot}$ <sup>3</sup>	3,33e-3	3,35e-3	1,83e-3	2,7e-3	1,13e-3	1,1e-3
$w$	1,0	2,5	1,6	-	0,5	-

<sup>1</sup>  $T_e$  é obtido de  $[S\ III] \lambda 9069 / [S\ III] \lambda 6312$ ; <sup>2</sup>  $n_e$  é obtido de  $[S\ II] \lambda 6716 / [S\ II] \lambda 6731$ ; <sup>3</sup> em erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

Tabela 4.5 - Valores médios de  $T_e$  e  $n_e$ ,  $H\beta_{tot}$  e pesos  $w$  são calculados para as regiões R5a, R5b, R6a, R6b, R7 e R8, modeladas com SUMA.

	R5a	R5b	R6a	R6b	R7	R8
$T_e$ (K) <sup>1</sup>	11800	11065	10500	-	-	-
$n_e$ (cm <sup>-3</sup> ) <sup>2</sup>	234	242	516	100	220	126
$H\beta_{tot}$ <sup>3</sup>	4,4e-3	1,5e-3	4,85e-3	4,82e-3	2,0e-3	1,4e-3
w	0,8	0,2	2,0	1,0	0,2	3,2

<sup>1</sup>  $T_e$  é obtido de  $[S\ III] \lambda 9069 / [S\ III] \lambda 6312$ ; <sup>2</sup>  $n_e$  é obtido de  $[S\ II] \lambda 6716 / [S\ II] \lambda 6731$ ; <sup>3</sup> em  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

e densidade. Modelos de fotoionização calculados com SUMA mostram que a região coronal é dominada por processos de choques, possivelmente pela passagem do jato rádio-emissor.

Nossa análise foi realizada para uma galáxia Serfert 2 com características únicas. Circinus tem sido amplamente estudada devido a sua proximidade com a Terra, e por apresentar um espectro em emissão com forte emissão coronal. Esse resultado nos leva a questionar se existem outras galáxias que possam ter emissão coronal tão ou mais estendida que em Circinus. O tamanho da CLR tipicamente relatado na literatura não ultrapassa umas poucas centenas de parsecs. Na nossa busca bibliográfica, apenas um AGN rádio-silencioso (NGC 3516) aparenta possuir gás coronal estendido até 1,5 kpc. Portanto, é necessário estudar objetos que possam ter características semelhantes a Circinus, isto é, emissão coronal estendida e que seja um AGN próxima da Terra (< 60) Mpc. Com esse intuito, selecionamos 6 galáxias para essa análise, que será apresentada no Capítulo 5.



## 5 ANÁLISE DA EMISSÃO CORONAL DA AMOSTRA DE GALÁXIAS

A região de linhas coronais foi tradicionalmente vinculada a uma região intermediária entre a BLR e a NLR (APPENZELLER; WAGNER, 1991). Essa conclusão veio do fato de que as linhas de alta ionização possuem densidades críticas para a de-excitação colisional da ordem de  $> 10^7 \text{ cm}^{-3}$  (ROBERTIS; OSTERBROCK, 1984). Os primeiros trabalhos que estudaram em detalhe a emissão coronal utilizaram espectros integrados de fenda longa. Esse é o caso de Erkens et al. (1997), que analisaram espectros em emissão de 15 galáxias e através da caracterização dos perfis de linhas encontraram correlações que implicavam uma CRL (*Coronal Line Region*) localizada na região mais interna da NLR, possivelmente associada a *outflows* de gás ionizado. Por exemplo, o incremento do valor do FWHM com o aumento do potencial de ionização da linha e a densidade crítica foi interpretado em termos de uma CLR compacta, na região mais interna da NLR. Ainda os centroides das linhas coronais estavam fortemente deslocados para o azul, com fortes assimetrias nas asas azuis das linhas, enquanto que o deslocamento de linhas de média e baixa ionização era menor ou ausente e seus perfis simétricos. O resultado indicava que o gás de mais alta ionização estaria associado a *outflows*. Murayama e Taniguchi (1998) propuseram um modelo alternativo, no qual a CLR, consistiria de 3 regiões: i) CLR próxima ao toróide ( $r < 1 \text{ pc}$ ), ii) CLR associada à NLR ( $10 < r < 100 \text{ pc}$ ), e iii) CLR muito estendida ( $r \sim 1 \text{ kpc}$ ). Esse modelo foi sugerido a partir da observação de espectros integrados, não era possível sua confirmação observacional. Evidências de uma CLR estendida foi antes relatada no trabalho de Tadhunter et al. (1987) e Tadhunter et al. (1988). Esses autores detectaram emissão de [Fe VII] na radiogaláxia PKS 2152-69 a  $\sim 8 \text{ kpc}$  do núcleo da galáxia. Essa emissão é co-espacial com um jato-rádio, indicando que a emissão coronal nessas regiões é produzida pela passagem do jato-rádio e sua interação com o ISM. Anos depois, nos trabalhos de Golev et al. (1994) e Golev et al. (1995) foi estudada a Galáxia Seyfert 1 NGC 3516. Os autores utilizaram imagens com um filtro centrado na linha de emissão de [Fe VII]  $\lambda 6087$  e encontraram emissão coronal a uma distância de  $\sim 1,5 \text{ kpc}$  do AGN.

Os primeiros estudos sistemáticos quanto à extensão e morfologia da emissão coronal em objetos radio-silenciosos surgiram apenas em meados de 2005. O trabalho de Prieto et al. (2005) foi pioneiro ao utilizar óptica adaptativa no VLT do ESO em quatro galáxias Seyfert. Os autores encontraram emissão coronal estendida em escalas de 30 pc a 200 pc, alinhadas com o cone de ionização. No trabalho de Rodríguez-Ardila et al. (2006), foram estudados espectros de 6 galáxias, encontrando pela primeira vez na literatura emissão coronal com duplo pico em dois desses objetos (NGC 1068

e NGC 1386). O resultado foi associado à presença de *outflows*. Adicionalmente, os autores aplicaram modelos de choques e fotoionização pelo AGN, utilizando o código SUMA. Para isso foram produzidos modelos tanto na região nuclear como na região estendida, eles confirmando a necessidade de choques para reproduzir as razões de linhas na emissão coronal estendida.

Estudos com dados IFUs trouxeram mais informação sobre a morfologia da emissão coronal em relação aos dados já conhecidos através de espectros de fenda longa (ver Capítulo 2). Müller-Sánchez et al. (2011) utilizaram dados IFU do SINFONI para resolver espacialmente a região de linhas coronais de 6 galáxias próximas. Eles encontraram gás de alta ionização estendido entre 80 pc e 150 pc do AGN, associado com *outflows* com velocidades de até de  $1500 \text{ km s}^{-1}$ . Os campos de velocidade sugerem *outflows* em forma bicônica. Mazzalay et al. (2013) utilizaram dados IFU com NIFS para estudar a galáxia NGC 1068. Os resultados indicam emissão de gás coronal até 170 pc ao nordeste e sudeste do núcleo da galáxia. A mesma galáxia foi recentemente estudada por Shin et al. (2021) usando dados do MUSE e obtiveram uma extensão coronal de  $\sim 400 \text{ pc}$ .

Como pode ser visto, através de espectroscopia IFU foi possível confirmar que o gás de alta ionização em AGNs é espacialmente estendido, o que de certa forma valida o modelo de Murayama e Taniguchi (1998). Mas, existe realmente uma componente mais interna da CRL associada ao toróide? Resultados recentes obtidos pelo GRAVITY, apresentados para galáxia Seyfert 1 NGC 3783 mostraram que a região coronal mais interna restringe-se a  $< 1 \text{ pc}$  da fonte central (AMORIM et al., 2021). Apesar dos avanços acima descritos, várias questões ainda permanecem em aberto: qual é a real extensão da emissão coronal em AGNs? Qual é o mecanismo de fotoionização mais importante na região estendida da CLR? Circinus é um caso especial ou a CRL pode efetivamente se estender a escalas maiores das já detectadas?

Estudos de AGNs radio-silenciosos têm mostrado emissão estendida em escalas de algumas poucas centenas de parsecs através de dados IFU no NIR (MAZZALAY et al., 2013; MAY et al., 2018; DURRÉ; MOULD, 2018b; SHIN et al., 2021). Estes trabalhos, porém, se limitam às regiões mais centrais da galáxia, principalmente porque foram realizados utilizando dados coletados com o SINFONI e o NIFS, que possuem campos de  $3'' \times 3''$  (ver Capítulo 2). Assim, aproveitando o grande campo de visão do MUSE, neste capítulo será analisada uma amostra de 6 galáxias Seyfert 2 radio-silenciosas (já brevemente apresentadas no Capítulo 2), sendo que algumas delas possuem estudos prévios da extensão da emissão coronal (ver a Tabela 5.1). O intuito é abordar as

principais questões em aberto mencionadas acima e confirmar nossa hipótese de que a emissão coronal estendida está invariavelmente associada com escoamentos de gás alimentados pelo rádio-jato.

Tabela 5.1 - Informações observacionais da extensão coronal das galáxias estudadas.

Galáxia	Extensão Coronal encontrada na literatura
Circinus	700 pc <sup>1</sup>
IC 5063	não estimado
NGC 5643	não estimado
NGC 3393	não estimado
NGC 5728	300 pc <sup>2</sup>
ESO 428-14	170 pc <sup>3</sup>
NGC 1068	400 pc <sup>4</sup>

Fonte: <sup>1</sup>Rodríguez-Ardila e Fonseca-Faria (2020); <sup>2</sup>Durré e Mould (2018b), <sup>3</sup>May et al. (2018); <sup>4</sup>Shin et al. (2021).

Para as análises que serão realizadas nos Capítulos 5 e 6 priorizamos nossos trabalhos em 12 linhas espectrais que consideramos ser essenciais. São elas:  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $[N\text{ II}]\lambda 6548$ ,  $[N\text{ II}]\lambda 6583$ ,  $[S\text{ II}]\lambda 6716$ ,  $[S\text{ II}]\lambda 6731$ ,  $[O\text{ III}]\lambda 5007$ ,  $[Fe\text{ VII}]\lambda 6087$ ,  $[O\text{ I}]\lambda 6300$ ,  $[S\text{ III}]\lambda 6312$ ,  $[S\text{ III}]\lambda 6096$  e  $[Fe\text{ X}]\lambda 6375$ . Realizamos todas as etapas para correção do cubo de dados já citadas no Capítulo 3, seguindo os procedimentos de binagem dos dados, subtração do contínuo estelar, correção da extinção atmosférica e ajuste dos espectros com 1 componente gaussiana para  $[Fe\text{ X}]\lambda 6375$  e 2 componentes gaussianas para as demais 11 linhas espectrais citadas.

Nas próximas seções, vamos caracterizar, a geometria, extensão e as condições físicas da emissão estendida em AGNs e sua relação com o jato rádio. Isso nos permitirá determinar se a presença de emissão coronal de alta ionização em um AGN é uma prova não-ambígua da interação do jato com o gás da NLR.

## 5.1 Extensão da emissão coronal

O estudo da extensão coronal das galáxias da nossa amostra é uma peça chave para registrar a componente mais energética do gás ionizado que participa do processo de *outflows*. Também, nos permite pesquisar sobre os mecanismos que estão dominando a fotoionização do gás desses objetos (fotoionização pelo AGN ou por choques). Apresentaremos aqui a emissão coronal sendo traçada pelas linhas de [Fe VII]  $\lambda 6087$  e [Fe X]  $\lambda 6375$ .

Podemos assim caracterizar qual a extensão máxima encontrada para as linhas de alta ionização e quais as estruturas da emissão coronal em cada objeto. Mapas de distribuição de fluxos para as linhas de emissão de [Fe VII]  $\lambda 6087$  e [Fe X]  $\lambda 6375$  são apresentados nas Figuras 5.1 a 5.6. A emissão coronal mais estendida não pode ser identificada com a configuração atual de binagem, necessitando uma binagem com um número maior de spaxels. Sendo assim, ao integrar mais de 4 spaxels, muitas vezes a linha de emissão buscada é identificada em regiões mais distantes do AGN. Em todos os mapas de emissão coronal apresentamos também o espectro detectado na região de máxima extensão da emissão correspondente. A região integrada está representada por um círculo cinza. A mesma análise realizada para emissão de [Fe VII]  $\lambda 6087$  foi reproduzida para [Fe X]  $\lambda 6375$  e apresentada nos painéis a direita das Figuras 5.1 a 5.6. Os valores obtidos para a máxima extensão coronal são apresentados na Tabela 5.2. Vale ressaltar que estamos apresentando pela primeira vez na literatura uma emissão coronal detectada a uma distância da ordem de quiloparsecs em AGNs radio-silencioso. Por exemplo, encontramos [Fe VII] a  $2,8 \pm 0,2$  kpc do AGN em NGC 1068, além da detecção de [Fe X] a  $1,2 \pm 0,2$  kpc do AGN em NGC 3393.

A seguir, apresentamos as características mais relevantes da emissão coronal nas galáxias estudadas do ponto de vista da morfologia e extensão do gás. Detalhes sobre os perfis de linha cinemática do gás e condições físicas da CLR serão descritos no próximo capítulo.

### 5.1.1 IC 5063

Na Figura 5.1 apresentamos o mapa de emissão coronal de IC 5063. No painel esquerdo da figura é identificada a emissão de [Fe VII] na região nuclear com fluxos da ordem de  $10^{-15}$  erg s $^{-1}$  cm $^{-2}$  spaxel $^{-1}$ . Detectamos emissão estendida alongada na direção noroeste-sudeste do AGN, com uma extensão total de  $\sim 2$  kpc. Observa-se um máximo de emissão na posição do AGN, possivelmente associado a uma região não resolvida ( $< 200$  pc). Também são identificadas duas regiões

(a 500 pc no sentido noroeste e a 400 pc no sentido sudoeste) com fluxo médio de  $\sim 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . Esses fluxos são aproximadamente 20 vezes menores que o fluxo nuclear. A emissão fora do núcleo possui um fluxo médio de  $\sim 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . A estrutura à noroeste aparenta encontrar uma barreira, formando um limite planificado com uma pequena ramificação na borda norte. A região mais estendida da emissão [Fe VII] foi identificada à distância de  $1193 \pm 139 \text{ pc}$ . Esse resultado foi obtido ao realizar uma integração em uma abertura circular de  $0,6''$  de raio.

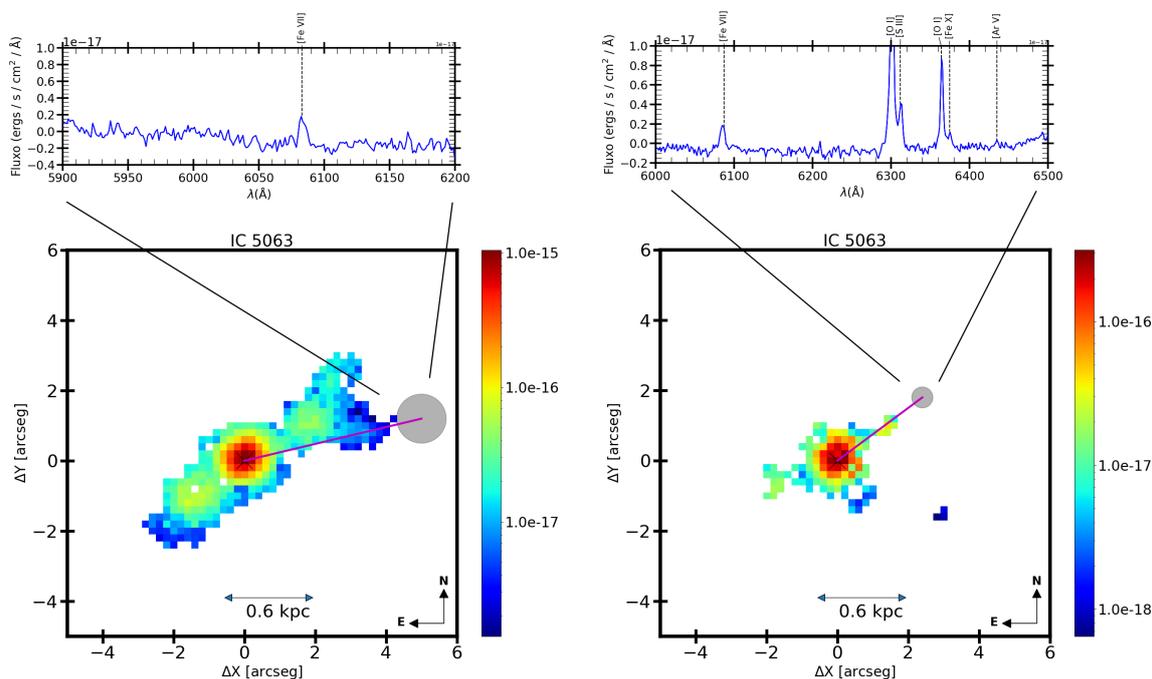
Na Figura 5.1 (painel da direita), apresentamos o mapa de emissão de [Fe X]. A emissão concentra-se predominantemente na região central, com fluxo médio no núcleo dado por  $1 \times 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ , mas claramente resolvida. De fato, existem três pequenas ramificações a leste, sudoeste e noroeste do AGN, com extensão máxima de 400 pc na binagem de  $1 \times 1$ . Realizamos uma varredura em todo o cubo MUSE e identificamos emissão de [Fe X] a uma distância máxima do AGN de  $696 \pm 46 \text{ pc}$ . Essa emissão está alinhada com a ramificação noroeste e foi observada após a integração do sinal em uma abertura de raio  $0,2''$ . É a primeira vez na literatura que emissão coronal estendida é observada nesse objeto, tanto a emissão de [Fe VII] quanto [Fe X]. É importante destacar que a emissão estendida é co-espacial com a emissão de [O III] e a emissão rádio.

### 5.1.2 NGC 5643

NGC 5643 (ver painel esquerdo da Figura 5.2) possui emissão coronal estendida, mapeada por meio da linha de [Fe VII]. O gás é claramente resolvido espacialmente, distribuído preferencialmente na direção leste-oeste. Ao leste possui uma extensão de 700 pc, enquanto a oeste detecta-se emissão até 300 pc, ambas em relação ao AGN. Esses valores foram obtidos usando o cubo com binagem de  $1 \times 1$ . A emissão na região nuclear apresenta um máximo na posição do AGN. O fluxo médio é de  $\sim 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . Existe uma ramificação a sudoeste, com valores relativamente altos de fluxos,  $\sim 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ , estendendo-se até 250 pc. Na extensão oeste, o fluxo médio de [Fe VII] é 100 vezes menor quando comparado ao nuclear. Embora a emissão oeste seja menos estendida ela possui um valor médio de fluxo cerca de 4 vezes maior que a emissão ao leste. A estrutura ao leste apresenta a região mais estendida da emissão de [Fe VII]. Identificamos a emissão de [Fe VII] à distância de  $845 \pm 46 \text{ pc}$ . Esse resultado foi obtido após realizar uma integração em um círculo de  $0,6''$  de raio.

O estudo da emissão de [Fe X] (ver o painel direito da Figura 5.2) mostra que na

Figura 5.1 - Mapas de fluxos da emissão coronal em IC 5063.



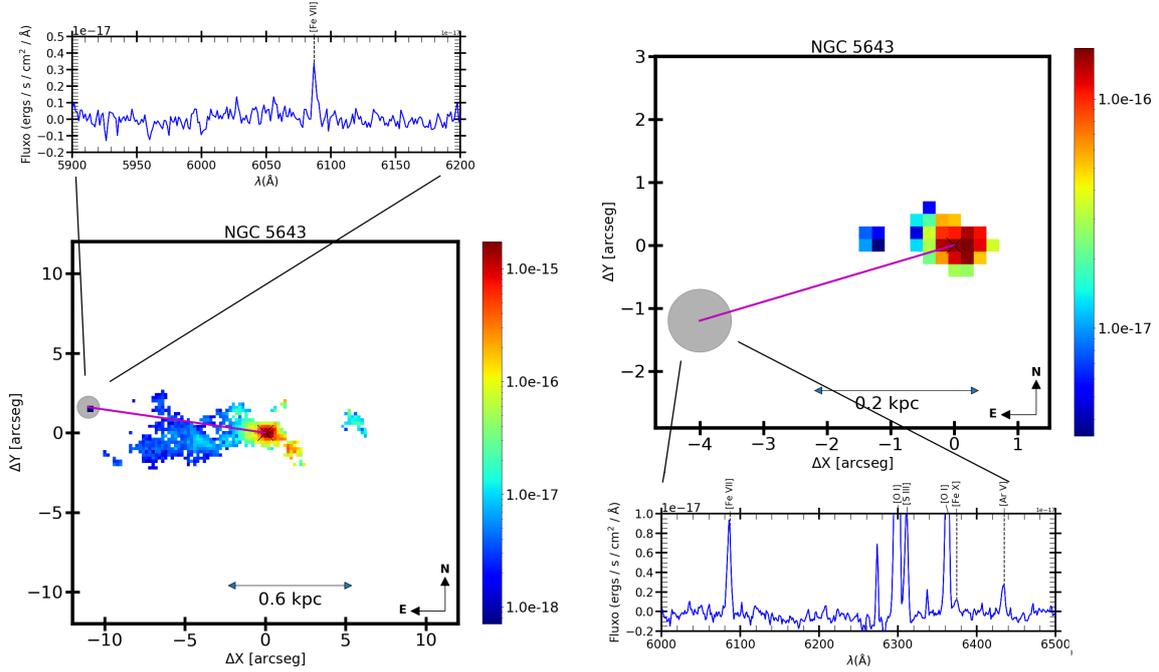
No painel superior esquerdo é apresentado o espectro da emissão mais estendida [Fe VII], identificada após a integração em uma abertura de raio 0,6'' (círculo cinza). No painel inferior esquerdo encontra-se a distribuição de fluxo de [Fe VII] para a galáxia. No painel da direita encontra-se o mapa de emissão de [Fe X] (painel inferior) e o espectro da emissão mais estendida [Fe X] integrado no círculo cinza de raio 0,2'' (painel superior). A barra magenta indica a máxima extensão onde a emissão coronal é encontrada.

binagem original do cubo ( $1 \times 1$ ) é possível identificar apenas a emissão de [Fe X] na região nuclear, sendo limitada ao seeing da observação ( $\sim 1''$ ). No entanto, uma binagem maior de spaxels permitiu detectar emissão de [Fe X] na borda inferior da estrutura leste no mapa de [Fe VII]. O gás emissor de [Fe X] situa-se a uma distância máxima de  $317 \pm 30$  pc do AGN, sendo identificado ao integrar o sinal em uma abertura circular de 0,4'' de raio. É a primeira vez na literatura que emissão estendida coronal é relatada nesse objeto. Como em IC 5063, o gás de alta excitação é coespacial à emissão de [O III] e rádio-contínuo.

### 5.1.3 NGC 3393

NGC 3393 (ver Figura 5.3) apresenta uma das mais espetaculares distribuições de gás de alta ionização dos objetos da amostra. A emissão está orientada na direção nordeste-sudoeste, sendo que no quiloparsec mais interno a emissão de [Fe VI] segue um formato de 'S', já previamente observada em [O III]. A estrutura em 'S' possui

Figura 5.2 - Mapas de fluxos da emissão coronal em NGC 5643.



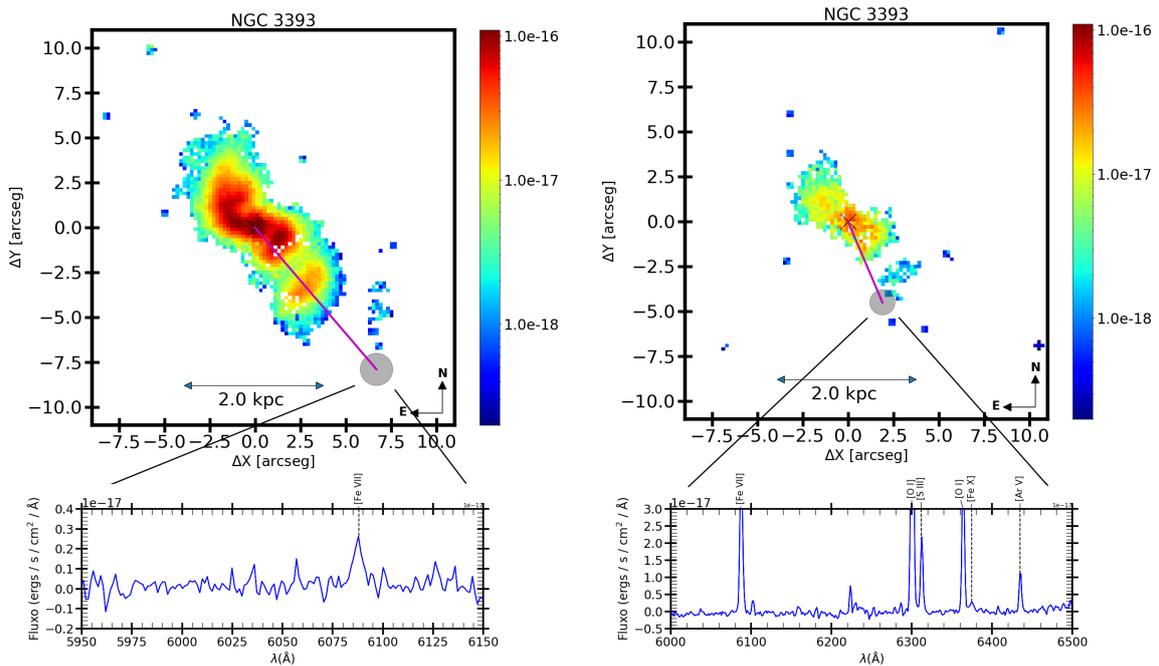
No painel superior esquerdo é apresentado o espectro da emissão mais estendida [Fe VII], identifica com a integração em um círculo de raio  $0,6''$  (círculo cinza). No painel inferior esquerdo encontra-se mapa de fluxos de [Fe VII] para a galáxia. No painel da direita encontra-se o mapa de emissão de [Fe X] (painel superior) e o espectro da emissão mais estendida [Fe X] integrado no círculo cinza de raio  $0,4''$  (painel inferior). A barra magenta indica a máxima extensão encontrada.

vários máximos na região mais central, com valores de  $\sim 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . Nas bordas externas da estrutura em ‘S’ o fluxo diminui gradativamente até  $2 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ .

Na porção sudoeste da estrutura em ‘S’, observa-se claramente um decréscimo da emissão de [Fe VII] seguido de um novo aumento da emissão, com máximo em uma região distante  $\sim 1 \text{ kpc}$  do AGN, com fluxo de [Fe VII] de  $2 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . Esta estrutura é alongada na direção perpendicular à da emissão preferencial de extensão de [Fe VII]. A parte mais brilhante possui uma morfologia similar a um grão de feijão. Continuando na direção sudoeste, a  $1,8 \text{ kpc}$  do AGN, e separada da estrutura em ‘S’, encontramos uma nova região estendida, de baixo brilho superficial, emitindo [Fe VII]. Identificamos a emissão de [Fe VII] na distância de  $2631 \pm 203 \text{ pc}$ . Esse resultado foi obtido ao realizar uma integração em uma abertura circular de  $0,8''$  de raio. Na direção oposta, isto é, ao nordeste do AGN, gas de alta ionização é observado até  $1,2 \text{ kpc}$  do AGN.

Em relação à emissão de [Fe X] (painel direito da Figura 5.3) os dados indicam presença de emissão espacialmente resolvida, em uma estrutura coincidente com a região mais intensa de [Fe VII] (fluxo de [Fe VII]  $> 10^{-17}$  erg s $^{-1}$  cm $^{-2}$  spaxel $^{-1}$ ). Esta emissão está orientada na mesma direção que a de [Fe VII]. A emissão de [Fe X] mais distante do AGN encontra-se na borda externa da estrutura em formato de feijão detectada em [Fe VII] a uma distância máxima de  $1241 \pm 152$  pc, sendo identificada ao integrar um conjunto de spaxels em um círculo de raio 0,4". Note que parte da emissão em formato de 'S' é também detectada em [Fe X]. Esta emissão apresenta um máximo coincidente com a posição do núcleo. Apesar de NGC 3363 ter sido amplamente estudada na literatura, principalmente pelo formato em 'S' do gás ionizado, esta é a primeira vez que emissão coronal em escalas de quiloparsecs é identificada nesse objeto. Ainda, a direção preferencial dessa emissão coincide espacialmente com a do jato rádio-emissor relatado na literatura.

Figura 5.3 - Mapas de fluxos da emissão coronal em NGC 3393.



No painel da esquerda é apresentado o mapa de emissão de [Fe VII], logo abaixo encontra-se o espectro integrado da emissão mais estendida [Fe VII]. Essa emissão é observada integrando o sinal em um círculo de raio 0,8" (círculo cinza). No painel da direita encontra-se o mapa de emissão de [Fe X] (painel superior) e o espectro da emissão mais estendida [Fe X] integrado no círculo cinza de raio 0,4" (painel inferior). A barra magenta indica a máxima extensão encontrada.

#### 5.1.4 NGC 5728

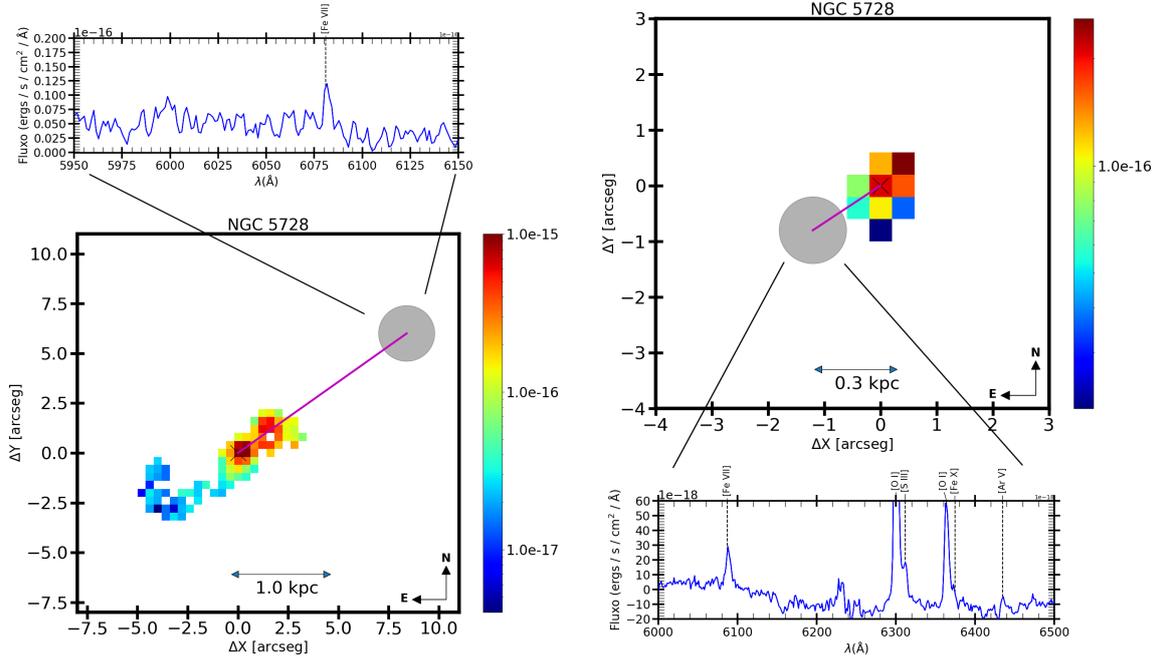
Na Figura 5.4 apresentamos o mapa de emissão coronal para NGC 5728. No painel da esquerda pode-se ver a estrutura da emissão de [Fe VII]. Na região mais interna identificamos dois máximos de emissão alinhados na direção SE-NO, ao longo da qual se distribui também a emissão estendida. O primeiro máximo coincide com a posição do núcleo e apresenta um fluxo de  $10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . O segundo máximo está localizado a  $1,84''$  (600 pc) a noroeste do primeiro, com um quinto da intensidade observada no núcleo. Existe, ainda, emissão estendida a sudeste, até 1,2 kpc do AGN. O fluxo dessa última componente é de  $2 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . A estrutura a sudeste apresenta um formato semelhante a uma bolha em expansão. Ao NO, identificamos a emissão mais distante de [Fe VII], localizada a  $2023 \pm 235 \text{ pc}$  do AGN. Esse resultado foi obtido após realizar uma integração em um círculo de  $1,2''$  de raio.

A distribuição de fluxo na linha de emissão de [Fe X] (ver o painel direito da Figura 5.4) apresenta emissão apenas na região nuclear, sendo limitada pelo seeing. No mapa original, cada spaxel equivale  $0,4''$ . Utilizando uma binagem maior de spaxels nos permitiu detectar emissão de [Fe X] na direção sudeste. A máxima extensão de [Fe X] identificada encontra-se a  $282 \pm 78 \text{ pc}$  do AGN. Para isso, o sinal foi integrado em uma abertura circular com raio de  $1,2''$ .

#### 5.1.5 ESO 428-14

O painel esquerdo da Figura 5.5 apresenta o mapa de emissão coronal da linha de [Fe VII]. Como nos demais casos explorados acima, esta emissão é bem resolvida espacialmente. O gás de alta ionização está distribuído preferencialmente na direção SE-NO. Na região nuclear encontramos um fluxo médio de  $3 \times 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . O fluxo permanece aproximadamente constante na parcela estendida para o sudeste até  $\sim 300 \text{ pc}$  do AGN. O fluxo médio desta emissão é de  $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . A intensidade da emissão estendida diminui gradativamente ao se afastar da estrutura estendida, chegando a valores de fluxo de  $5 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$  nas bordas. A análise da emissão de [Fe VII] permite encontrar uma região alongada para o noroeste a 200 pc do AGN e a sudeste a 450 pc da fonte central. Por fim, identificamos a emissão mais distante de [Fe VII] à distância de  $638 \pm 86 \text{ pc}$  na direção sudeste. Esse resultado foi possível após a integração do sinal em um círculo de  $0,8''$  de raio. É importante ressaltar que emissão estendida na linha de [Si VI]  $\lambda 19630$  foi já relatada nesse objeto. A direção dessa emissão coincide espacialmente com a de [Fe VII], porém é detectada somente até uma distância de 170 pc ao SE do AGN (MAY et al., 2018). Portanto, neste trabalho reportamos uma

Figura 5.4 - Mapas de fluxos da emissão coronal em NGC 5728.

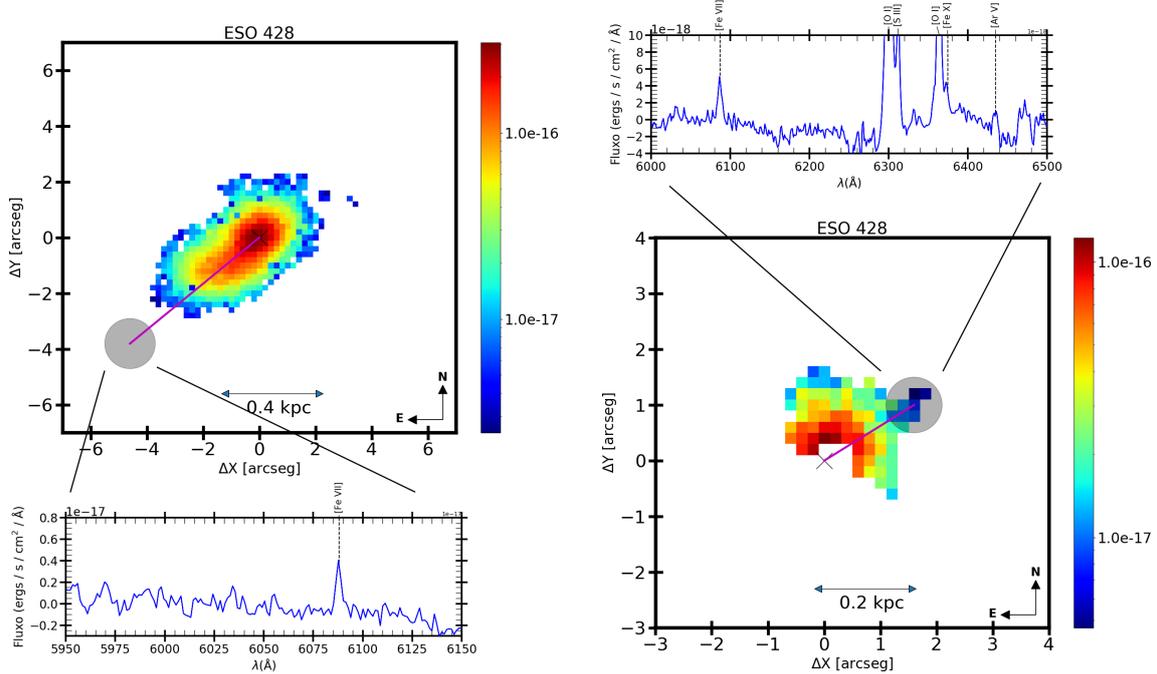


No painel da esquerda é apresentado o mapa de emissão de [Fe VII], no painel acima encontra-se o espectro integrado da emissão mais estendida de [Fe VII]. Essa emissão foi detectada integrando o sinal em um círculo de raio  $1,2''$  (círculo cinza). No painel da direita encontra-se o mapa de emissão de [Fe X] (painel superior) e o espectro da emissão mais estendida [Fe X] integrado no círculo cinza de raio  $1,2''$  (painel inferior). A barra magenta indica a máxima extensão encontrada.

CLR três vezes maior que o valor previamente reportado na literatura.

A emissão de [Fe X] é apresentada no painel direito da Figura 5.5. Presença de emissão estendida dessa linha é identificada na região norte, nordeste e oeste do AGN, a 180 pc do núcleo. Porém, tal emissão não foi identificada na região nuclear nem a sudeste do AGN, onde a linha de [Fe VII] é preferencialmente detectada. Identificamos a emissão mais estendida de [Fe X] a noroeste do AGN na região onde existe uma pequena ramificação no mapa de fluxo. O espectro onde confirma a presença de [Fe X] provêm da integração do sinal em uma abertura circular de  $1,2''$  de raio. Dessa forma, a máxima extensão de [Fe X] identificada encontra-se a  $202 \pm 43$  pc do AGN. A emissão do jato rádio nesse objeto está alinhada ao longo da direção na qual a emissão coronal é observada. Ainda, no ponto onde identificamos a emissão mais distante de [Fe X], coincide com a região onde o jato aparenta mudar de direção em aproximadamente  $90^\circ$ .

Figura 5.5 - Mapas de fluxos da emissão coronal em ESO 428.



No painel da esquerda é apresentado o mapa de emissão de [Fe VII]. No painel inferior encontra-se o espectro integrado da emissão mais estendida de [Fe VII]. Essa emissão tem sido observada integrando o sinal em um círculo de raio  $0,8''$  (círculo cinza). No painel da direita encontra-se o mapa de emissão de [Fe X] (painel inferior) e o espectro da emissão mais estendida [Fe X] integrado no círculo cinza de raio  $0,4''$  (painel superior). A barra magenta indica a máxima extensão encontrada.

### 5.1.6 NGC 1068

NGC 1068 é a galáxia que apresenta a emissão coronal com maior intensidade e extensão da nossa amostra (ver Figura 5.6). Na região nuclear identificamos um fluxo médio de  $4 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ , em uma estrutura alongada no sentido norte-nordeste e sul-sudeste com fluxos médios de  $\sim 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$  e extensões de respectivamente 800 pc e 400 pc em relação ao AGN. Utilizando a binagem  $3 \times 3$  foi possível identificar emissão de [Fe VII] a 2 kpc do AGN na região nordeste do AGN, com fluxo de  $5 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . Na direção nordeste foi também identificada a máxima extensão de [Fe VII] detectada a uma distância de  $2820 \pm 197 \text{ pc}$  do AGN. Esse resultado foi obtido ao integrar uma região circular de  $1,2''$  de raio. Essa extensão coronal é a máxima extensão já identifica em uma galáxia Seyfert 2.

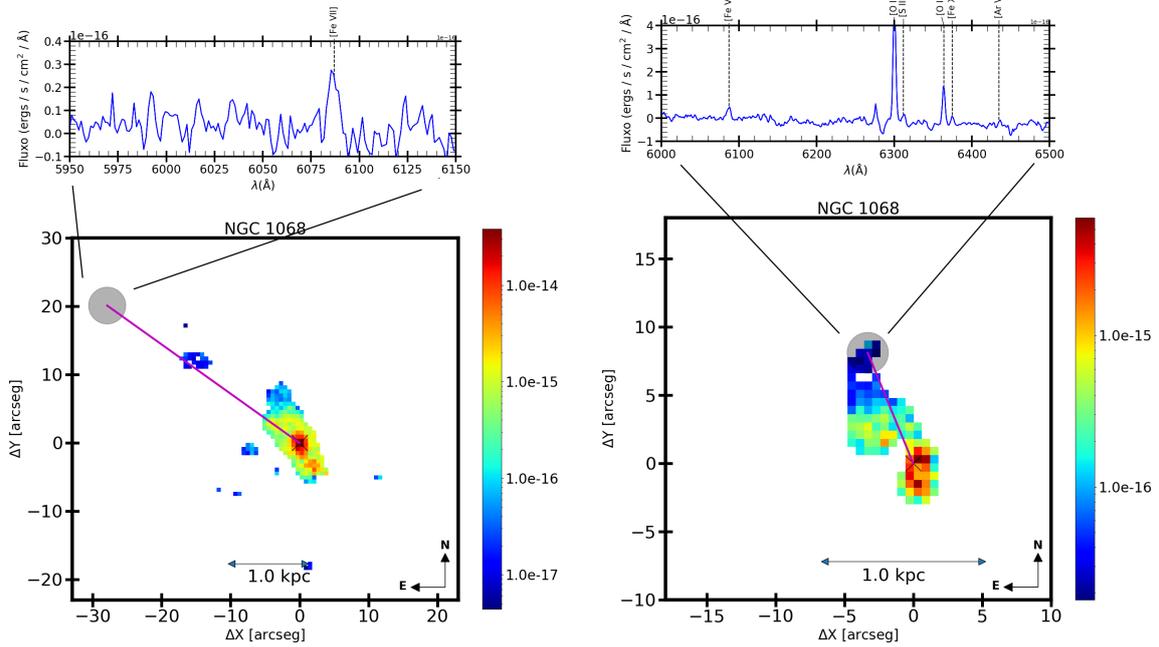
Previamente, Rodríguez-Ardila et al. (2006) relatam emissão estendida de

[Fe VII]  $\lambda 6087$  nessa galáxia usando espectroscopia de fenda-longa. A emissão estava preferencialmente distribuída ao norte do AGN e foi detectada até distâncias de  $\sim 250$  pc. O perfil de duplo pico observado no gás emissor de alta ionização foi interpretado em termos de um outflows de gás coronal. Posteriormente, [Mazzalay et al. \(2013\)](#) encontraram emissão estendida usando observações IFU com AO através das linhas de [Si VI]  $\lambda 19630$  e [Si VII]  $\lambda 24820$ . A emissão é coincidente com a região mais interna no mapa de [Fe VII]  $\lambda 6087$ . Devido ao tamanho do IFU ( $3' \times 3'$ ), não foi possível detectar gás coronal a distâncias maiores.

É igualmente importante mencionar que a emissão coronal em NGC 1068 está bem alinhada com a direção e a morfologia do jato rádio-emissor. Contudo, a extensão do jato na direção NE é de apenas  $\sim 500$  pc, isto é, está confinado na região central da galáxia. Portanto, as nuvens emissoras de [Fe VII] observadas a  $\sim 1200$  pc e  $\sim 2800$  pc ao NE do AGN, se originadas pelo jato, são devidas a uma componente rádio ainda não detectada. Pode indicar, ainda, que o jato tem uma eficiência radiativa muito baixa e está depositando grande parte da sua energia de forma mecânica, ao longo da direção de propagação.

[Fe X] apresenta emissão claramente estendida (ver o painel direito da Figura 5.6). Identificamos [Fe X] na região norte-nordeste à distância de 700 pc do AGN, além de uma estrutura ao sul a 240 pc da fonte central. A máxima extensão dessa linha foi identificada na direção norte-nordeste do AGN na região onde existe uma pequena ramificação, detectada no mapa de fluxos. A máxima extensão de [Fe X] foi observada a uma distância de  $717 \pm 98$  pc do AGN. A emissão foi observada ao integrar um círculo com  $0,4''$  de raio.

Figura 5.6 - Mapas de fluxos da emissão coronal em NGC 1068.



No painel da esquerda é apresentado o mapa de emissão de [Fe VII], no painel acima encontra-se o espectro integrado da emissão mais estendida [Fe VII], essa emissão tem sido observada utilizando a integração em um círculo de raio 1,2'' (círculo cinza). No painel da direita encontra-se o mapa de emissão de [Fe X] (painel inferior) e o espectro da emissão mais estendida [Fe X] integrado no círculo cinza de raio 0,4'' (painel superior). A barra magenta indica a máxima extensão encontrada.

Tabela 5.2 - Valores da extensão coronal máxima encontrada para as linhas de emissão de [Fe VII] e [Fe X].

Objeto	[Fe VII] $\lambda 6087$ (pc)	[Fe X] $\lambda 6375$ (pc)
Circinus	$684 \pm 36$	$408 \pm 48$
IC 5063	$1193 \pm 139$	$696 \pm 46$
NGC 5643	$845 \pm 46$	$317 \pm 30$
NGC 3393	$2631 \pm 203$	$1241 \pm 152$
NGC 5728	$2023 \pm 235$	$283 \pm 78$
ESO 428-14	$638 \pm 86$	$202 \pm 43$
NGC 1068	$2820 \pm 197$	$717 \pm 98$

Parte da amostra de galáxias utilizada neste trabalho não possui estudos prévios sobre a extensão da emissão coronal. Sendo assim, o trabalho está apresentando, pela primeira vez, detalhes da extensão da emissão coronal desses objetos utilizando dados IFUs. Na Tabela 5.1 foram catalogados os dados já publicados da extensão coronal de 4 galáxias da nossa amostra (Circinus, NGC 5728, ESO 428-14 e NGC 1068). A análise realizada neste trabalho confirma que Circinus não é o único objeto com emissão coronal estendida em escalas de centenas de parsecs ou, ainda, de quilo-parsecs. Podemos verificar que todos os objetos da nossa amostra possuem emissão coronal com uma extensão da mesma ordem ou maior que a de Circinus. Encontramos uma extensão de até  $\sim 3$  kpc nas galáxias NGC 3393 e NGC 1068. A confirmação da presença de uma região coronal estendida nessas escalas sugere que devem existir mecanismos de fotoionização além da emissão da fonte central. Assim como visto em Circinus, as evidências apontam para um papel central dos efeitos de choques devido a passagem de um jato. Abordaremos com mais detalhes essa discussão nas próximas seções.

Na Tabela 6.1, são apresentados dados da luminosidade bolométrica de cada galáxia (dados disponíveis também no Capítulo 2). Na Figura 5.7, apresentamos um gráfico da luminosidade para cada objeto (eixo  $Y$ ) e os valores da extensão coronal (eixo  $X$ ). Os eixos  $X$  e  $Y$  do gráfico estão em escalas logarítmica. Observa-se uma correlação linear entre a extensão coronal e a luminosidade bolométrica da fonte central, indicando que a extensão da emissão coronal está diretamente relacionada a luminosidade do AGN. A reta tracejada no gráfico da Figura 5.7 foi obtida após um ajuste linear. O resultado do ajuste indica uma solução do tipo  $\text{Log}(L_{um}) = (3, 1 \pm 0, 5) \times \text{Log}(Ext) + (34, 3 \pm 5, 1)$ ; com valor-p igual a 0,023. O termo  $L_{um}$  representa a luminosidade do AGN em unidades de  $L_{\odot}$  e  $Ext$  é a extensão coronal encontrada em unidades de parsecs. Vale ressaltar que no trabalho de Venturi et al. (2021) os autores encontraram uma associação entre a potência do jato-rádio da galáxia com a massa e energia dos *outflows*. Sabe-se que galáxias mais luminosas possuem jatos mais potentes. Portanto, os resultados dessa seção estão de acordo com trabalhos prévios, uma vez que encontramos uma correlação entre a extensão da emissão coronal, associada aos *outflows*, e a luminosidade do AGN.

## 5.2 Diagrama BPT

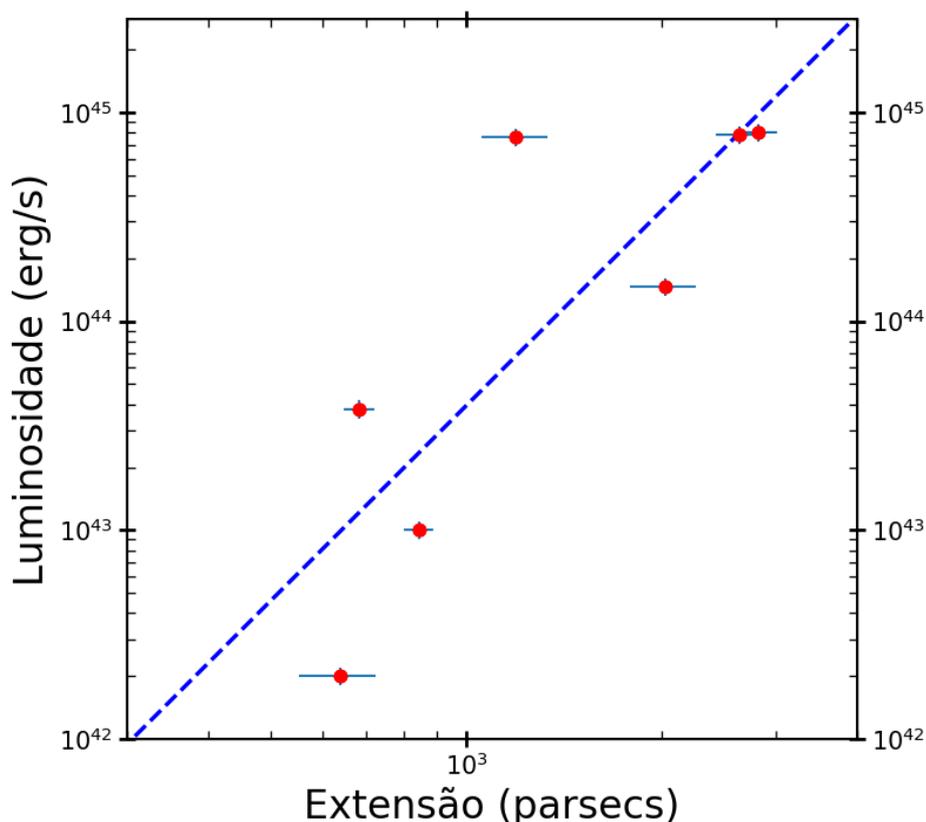
Nesta seção, faremos uma análise da excitação do gás nas galáxias utilizando o diagrama de diagnóstico  $\log([\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta)$  versus  $\log([\text{N II}] \lambda 6584 / \text{H}\alpha)$  proposto por Veilleux e Osterbrock (1987). O diagrama separa regiões dominadas por forma-

Tabela 5.3 - Informações de distância, luminosidade e extensão da emissão coronal da amostra das galáxias.

	Circinus	IC 5063	NGC 5643	NGC 3393	NGC 5728	ESO 428	NGC 1068
Velocidade <sup>1</sup>	434	3402	1199	3750	2804	1698	1137
Escala <sup>2</sup>	19	239	76	254	196	107	82
Distância (Mpc)	19	49,3	15,8	52,4	40,5	22,0	16,9
$L_{\text{Bol}}$ <sup>3</sup>	$3,8 \times 10^{43}$	$7,6 \times 10^{44}$	$1,0 \times 10^{43}$	$7,8 \times 10^{44}$	$1,5 \times 10^{44}$	$1,5 \times 10^{42}$	$8,0 \times 10^{44}$
$L_{\text{Edd}}$ <sup>4</sup>	$2,1 \times 10^{44}$	$3,8 \times 10^{46}$	$3,5 \times 10^{44}$	$3,9 \times 10^{45}$	$4,4 \times 10^{45}$	$2,5 \times 10^{45}$	$2,0 \times 10^{45}$
$L_{\text{Bol}}/L_{\text{Edd}}$	0,2	0,02	0,03	0,2	0,03	0,008	0,5
Extensão <sup>5</sup>	684 pc	1193 pc	845 pc	2631 pc	2023 pc	638 pc	2820

<sup>1</sup> Velocidade Radial da galáxia em  $\text{km s}^{-1}$ ; <sup>2</sup> escala em unidades de pc por segundo de arco; <sup>3</sup> luminosidade bolométrica do AGN em unidades de  $\text{erg s}^{-1}$ ; <sup>4</sup> luminosidade de Eddington em unidades de  $\text{erg s}^{-1}$ ; <sup>5</sup> máxima extensão da emissão coronal. As fontes dos de luminosidade e distância foram previamente apresentadas no Capítulo 2.

Figura 5.7 - Gráfico da luminosidade bolométrica versus a extensão coronal.



ção estelar (SF, do inglês *Star Formation*), daquelas dominadas por fotoionização pelo AGN de acordo com os valores das razões de linhas medidas em uma fonte astronômica. Para a separação entre AGNs e região H II, utilizamos o limite teórico proposto em Kewley et al. (2001).

Na Figura 5.8, apresentamos  $\log([\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta)$  versus  $\log([\text{N II}] \lambda 6584 / \text{H}\alpha)$

para as galáxias da amostra. Para cada objeto, dois painéis são mostrados. À esquerda encontra-se o diagrama BPT e à direita os mesmos pontos da esquerda, mas agora localizados espacialmente em cada galáxia. Isso nos permite associar a fonte de ionização dominante com uma posição espacial no objeto estudado. Em todos os casos, os pontos em azul representam spaxels com razões de linhas típicas de regiões H II enquanto a cor vermelha representa spaxels onde a fonte de ionização é associada ao AGN. Em verde identificamos os spaxels que apresentam emissão na linha de [Fe VII] e, em preto, os spaxels associados à região nuclear da galáxia. O tamanho desta última é igual ao *seeing* medido nas observações (ver Tabela 2.1).

Encontramos, através dos diagramas BPT, que mais de 95% dos spaxels que apresentam linhas de [Fe VII] ocupam a região dominada pelo AGN. Esse resultado confirma que os processos estelares, embora estejam possivelmente presentes na região associada ao spaxel, não são os mecanismos dominantes na excitação do gás.

Embora a galáxia Circinus possua evidências de um contra-cone mapeado em observações de raios-x e rádio (MINGO et al., 2012), não identificamos essas evidências aqui. Os resultados apresentados para Circinus indicam uma região dominada pelo AGN no cone noroeste. Porém, no contra-cone (a sudeste), não detectamos emissão dominada pelo AGN; apenas regiões H II são identificadas. Esse resultado está de acordo com a emissão de [Fe VII], a qual também não foi identificada no contra-cone. No diagrama BPT de Circinus os spaxels da região do cone permanecem próximos da divisa entre as regiões H II e AGN. Isso pode ocorrer devido à contribuição estelar na emissão de [O III], principalmente porque o disco da galáxia encontra-se atrás do cone. Braços espirais e gás ionizado encontram-se no mesmo plano do céu.

Nas galáxias IC 5063 e ESO 428, a maior parte dos spaxels são dominados pelo AGN, com exceção de uma pequena região ao sudoeste (para IC 5063 e ESO 428) e no sudeste (para ESO 428) do AGN. Além disso, em todos os objetos exceto em NGC 1068, a região dominada pelo AGN está alinhada com a emissão de [Fe VII], indicando a direção do cone de ionização da galáxia.

Nas galáxias NGC 5643 e NGC 3393, os spaxels dominados por regiões H II estão localizados a mais de 1 kpc do AGN. Inclusive, em NGC 3393 estas regiões se localizam na direção perpendicular ao eixo do cone. Em NGC 5728 vemos a região dominada pelo AGN na direção sudeste e de parte do contra-cone ao noroeste. Nesta última direção identificamos a região mais estendida para [Fe VII] (ver Figura 5.4). Ainda, em NGC 5728 existe uma região H II a 500 pc do AGN no sentido NO. Essa região é co-espacial com um valor alto de extinção (ver Figura 5.9), possivelmente pela

existência de um braço da galáxia.

Em NGC 1068, observamos razões típicas de região H II ao oeste do núcleo e na maior parte da região SE. Foi identificada também uma estrutura central, de até 1 kpc de extensão, dominada pelo AGN. Identificamos também duas estruturas em forma de arco, tanto ao norte quanto a sul, a  $\sim 2,0$  kpc do AGN. Espacialmente, esses arcos contornam as bordas externas de um anel de formação estelar, com forte atividade starburst já detectada nessa galáxia (DAVIES et al., 1998; RICO-VILLAS et al., 2021).

Figura 5.8 - Diagrama BPT para as galáxias.

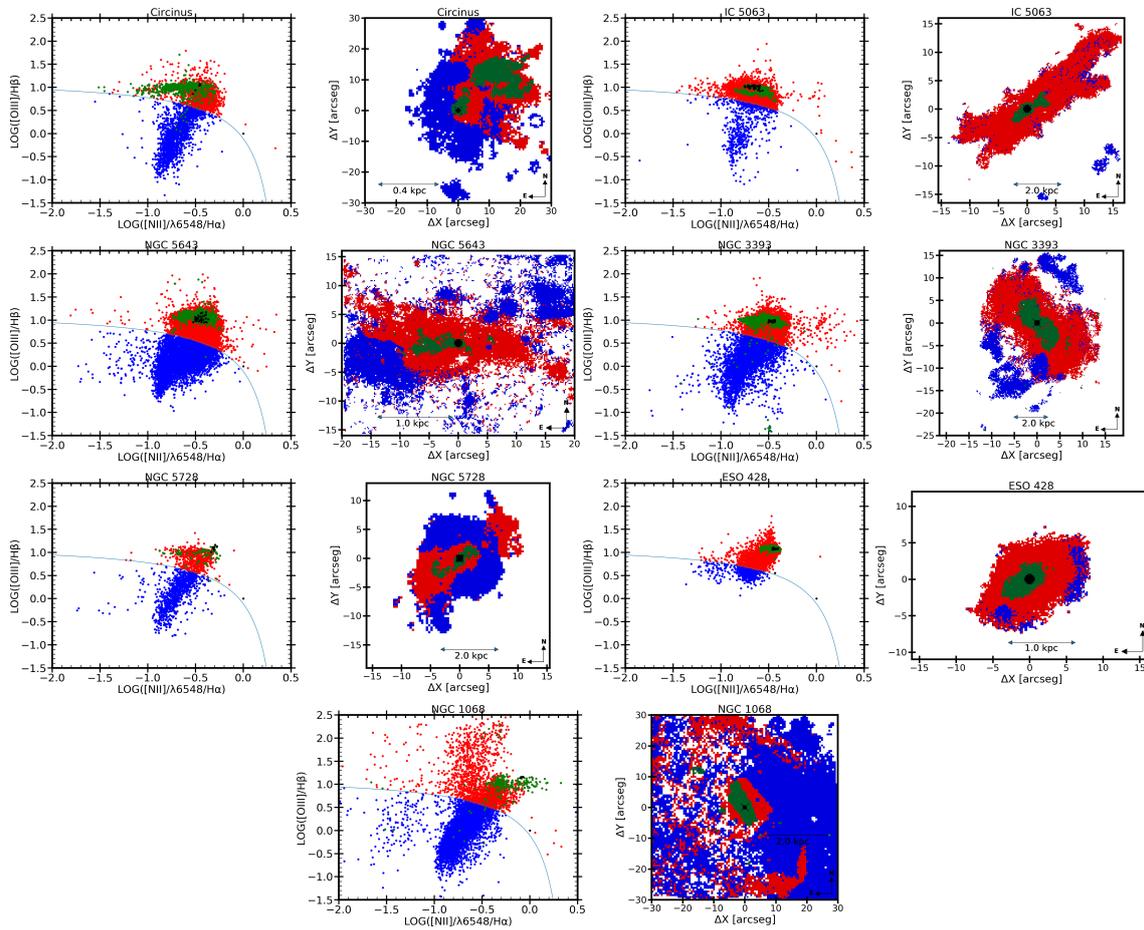


Diagrama BPT  $\log ([\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta)$  versus  $\log ([\text{N II}] \lambda 6584 / \text{H}\alpha)$  para as galáxias da amostra. Para cada galáxia, dois painéis são mostrados. A esquerda está o diagrama BPT e a direita o mapa da galáxia com a localização espacial dos spaxels do diagrama. No painel da direita de cada galáxia temos os mapas das regiões dominadas pelo AGN (em vermelho), região H II (em azul). Adicionalmente tem-se as mascarás para emissões do  $[\text{Fe VII}]$  (em verde) e do núcleo (em preto).

### 5.3 Relação entre a emissão rádio e a emissão coronal

Nessa seção, catalogamos mapas de emissão de rádio presente nas galáxias de nossa amostra. Os mapas rádio foram obtidos utilizando dados no formato FITS e imagens já publicadas em artigos. Para as imagens dos artigos foi escrito um código em PYTHON para obtenção do contorno da imagem. Para essa etapa seguimos os seguintes passos: i) obter uma imagem JPEG do artigo original, ii) utilizar um código em PYTHON para importar a imagem e transformá-la em uma matriz de valores, iii) encontrar a relação pixel / arcseg para escalonar a imagem importada e iv) fazer um plot da imagem final (imagem com contornos) sobreposta ao mapa desejado. As imagens utilizadas neste trabalho e suas respectivas fontes estão disponíveis na Tabela 5.4.

Na Figura 5.9 são apresentados mapas de extinção (mapas da primeira e segunda coluna) e os mapas de fluxos para a linha de [Fe VII] (mapas da terceira coluna). Em todas as galáxias apresentamos os contornos rádio (em preto) encontrados da literatura. O intuito dessa figura é mostrar se existe uma relação entre a emissão rádio, emissão coronal e extinção. Sabe-se que é necessário destruir grãos de poeira para produzir gás de  $\text{Fe}^{+6}$ . Choques com velocidades acima de  $150 \text{ kms}^{-1}$  são suficientes para destruir a poeira (CONTINI, 2015). Será verificado no Capítulo 6 que as linhas de [Fe VII] possuem larguras maiores que  $150 \text{ kms}^{-1}$ . Sendo assim, é esperado que a emissão coronal, que está associada a choques, esteja associada a regiões com baixa extinção e alinhada com a emissão rádio.

Tabela 5.4 - Informações observacionais da extensão coronal das galáxias estudadas.

Objeto	Frequência	Instrumento utilizado	Fonte
Circinus	$\nu = 2,3 \text{ GHz}$	ATCA <sup>1</sup>	(ELMOUTTIE et al., 1998)
IC 5063	$\nu = 17 \text{ GHz}$	ATCA	<sup>3</sup>
NGC 5643	$\nu = 8,4 \text{ GHz}$	VLA <sup>2</sup>	(LEIPSKI et al., 2006)
NGC 3393	$\nu = 8,5 \text{ GHz}$	VLA	<sup>4</sup>
NGC 5728	$\nu = 4,9 \text{ GHz}$	VLA	(DURRÉ; MOULD, 2018b)
ESO 428-14	$\nu = 4,9 \text{ GHz}$	VLA	<sup>4</sup>
NGC 1068	$\nu = 8,4 \text{ GHz}$	VLA	(KUKULA et al., 1995)

<sup>1</sup> *Australia Telescope Compact Array radio*; <sup>2</sup> *Very Large Array*; <sup>3</sup> Dados fornecidos pela Dra. Rafaela Morganti; <sup>4</sup> fonte: NASA/IPAC Extragalactic Database (NED).

Na Figura 5.9, os mapas de Circinus, NGC 5643 e NGC 5728 apresentam a extensão

da emissão rádio maior que a emissão coronal. Por exemplo, em Circinus a emissão rádio encontra-se três vezes mais estendida. Nas galáxias IC 5063, NGC 3393, ESO 428 e NGC 1068 a emissão rádio é mais compacta que a emissão coronal. Em todas as galáxias é evidente que a emissão coronal está associada com a emissão rádio, principalmente nas galáxias IC 5063, NGC 5643 e ESO 428. Nessas galáxias a emissão rádio foi detectada co-espacialmente com os spaxels mais intensos em [Fe VII].

Em Circinus a emissão rádio se estende até 2 kpc na mesma direção do cone de ionização a noroeste. Porém, os dados rádio não possuem resolução suficiente para apresentar detalhes da estrutura na região mapeada por [Fe VII]. IC 5063 possui 3 spots com emissão intensa em [O III] e [Fe VII]. Esses spots encontram-se próximos localmente com a emissão rádio e com a divisão entre a região com alto avermelhamento ( $A_v \sim 0,9$ , a norte) e baixo avermelhamento ( $A_v \sim 0,2$ , a sul). A emissão rádio na galáxia parece ser contornada pela emissão coronal. Na Figura 5.9 (segunda fileira e terceira coluna) os spots de emissão coronal mais intensos são levemente deslocados dos spots de emissão rádio. Na estrutura coronal a sudeste o spot coronal encontra-se  $0,5''$  deslocada da emissão rádio. Na estrutura coronal a noroeste o spot de emissão coronal encontra-se  $0,5''$  a norte do spot de emissão rádio.

Em NGC 5643, a emissão rádio se mostra alinhada com [Fe VII] na direção leste-oeste. A emissão de [Fe VII] se estende até  $\sim 900$  pc a leste e 400 pc a oeste. No sentido oeste o spot mais intenso em rádio possui uma pequena estrutura de emissão coronal localizada na borda norte no máximo contorno rádio na região. Percebe-se que a estrutura rádio no sentido oeste contém maior quantidade de poeira (Figura 5.9, painel da terceira fileira e segunda coluna) com valores de extinção  $\sim 1$ , enquanto no sentido leste é menor ( $\sim 0,2$ ). Uma possível explicação dessa configuração seria a destruição da poeira na direção leste devido a choques. Na direção oeste os choques ainda não destruíram toda a poeira, impedindo a formação de gás de ferro e conseqüentemente a emissão de [Fe VII]. Esse resultado é semelhante ao observado na galáxia NGC 5728, onde a emissão rádio se encontra a noroeste e sudeste. No sentido sudeste, a extinção permanece com valores menores que 0,4 (com evidente emissão de [Fe VII]), enquanto a noroeste a extinção é maior que 0,7 (sem emissão de [Fe VII] co-espacial com a emissão rádio). No entanto, nessa galáxia identificamos [Fe VII] a noroeste, próxima da emissão rádio em uma região com extinção  $< 0,4$ .

NGC 3393 apresenta uma emissão rádio a sudoeste e a nordeste, coincidente com a emissão mais intensa de [Fe VII]. Na maior parte do mapa de extinção valores entre

0,1 e 0,6 são observados. Existe uma pequena região de emissão coronal a sudoeste, a 2,5 kpc do AGN, onde a extinção é  $< 0,1$ . Essa região coincide com a emissão mais estendida de [Fe VII]. Ainda, os spots de emissão rádio encontram-se deslocados em 0,5" dos máximos de emissão coronal detectados na estrutura em 'S', assim como observado na IC 5063.

ESO 428 possui emissão rádio compacta, com extensão de 500 pc a sudeste. A extensão máxima de [Fe VII] está localizada a sudoeste, em uma região onde existe uma queda no valor de avermelhamento, atingindo valores menores que 0,4.

NGC 1068 possui emissão rádio compacta, distribuída em uma estrutura alongada a nordeste a 450 pc do AGN. Existe ainda uma região radioemissora localizado a 400 pc a sudoeste do AGN. O mapa de extinção apresenta uma estrutura em forma de braço espiral a 2 kpc a nordeste do AGN. Possivelmente existe uma fragmentação desse braço próximo à região detectada pela máxima extensão de [Fe VII].

Os resultados quanto à emissão coronal, emissão rádio e a extinção nos permitem pontuar alguns resultados importantes. Segue abaixo um resumo desses resultados.

- A emissão rádio está diretamente associada com a emissão coronal. As galáxias com maiores extensões coronais ( $> 2$  kpc) possuem emissão rádio mais compacta ( $< 1$  kpc). Corroboram com esse resultado as galáxias NGC 3393, NGC 5728 e NGC 1068. A galáxia IC 5063 possui características semelhantes, com extensão coronal até 1,2 kpc, enquanto a emissão rádio estende-se até 500 pc.
- As galáxias com emissão rádio mais estendida ( $\sim 2$  kpc) possuem emissão coronal mais compacta que as demais galáxias ( $< 900$  pc). Essa característica é encontrada nas galáxias NGC 5643 e Circinus.
- Encontramos uma associação entre os valores de extinção nas galáxias e a sua emissão coronal estendida. Observamos que a emissão coronal é detectada preferencialmente em região com menor quantidade de poeira. Não identificamos emissão coronal estendida em regiões onde a extinção é maior que 0,8.
- Nos mapas da IC 5063 e NGC 3393, percebe-se que a emissão mais intensa de [Fe VII] contorna os spots de emissão rádio. Esse resultado aparentemente é encontrado na NGC 1068, porém existe apenas uma borda de forte emissão coronal ao leste da estrutura rádio (na estrutura nordeste).

Esses resultados evidenciam a expansão do gás pela passagem do jato produzindo uma compressão lateral e produzindo choques que estimularam a produção de emissão de alta ionização.

Além da emissão rádio, é importante ressaltar a detecção de emissão de raios-X estendido na maior parte das galáxias estudadas. Choques produzem emissão contínua de alta energia, principalmente pelo aquecimento do gás à temperaturas de  $10^6$  K ou mais (ver Figura 4.29). Portanto, a associação entre emissão Rádio, de Raio-X e coronal providencia evidências adicionais do mecanismo de choques como responsável pela produção da emissão coronal estendida nas galáxias.

Em Circinus, encontramos emissão de raio-X principalmente na região co-espacial aos maiores valores de fluxos de [O III] ( $> 10^{-14}$  erg s $^{-1}$  cm $^{-2}$  spaxel $^{-1}$ ) e de emissão coronal estendida apresentada aqui. A imagem de raio-X de Circinus é apresentada em [Rodríguez-Ardila e Fonseca-Faria \(2020\)](#).

A galáxia IC 5063 apresenta emissão raio-X alinhada com a emissão coronal, sendo detectada principalmente na borda externa da emissão estendida de [Fe VII] no sentido SE-NO. Em NGC 5643 a emissão de raio-X é detectada na região central e em uma estrutura estendida no sentido leste, sendo observada até à distância de 700 pc do núcleo. A morfologia dessa emissão é muito semelhante à da região onde foi detectado [Fe VII].

Em NGC 3393 a emissão de raio-X contorna a emissão coronal. De fato, a emissão de raio-X aumenta seguindo o incremento dos valores de fluxos de [Fe VII]. Neste objeto, análise detalhada da emissão nuclear e estendida em raio-X foi realizada por [Maksym et al. \(2017\)](#). Os autores encontram vários indícios da contribuição de choques ao *feedback* nas regiões onde o jato do núcleo ativo influencia mais diretamente o ISM. As imagens de raio-X para as galáxias IC 5063, NGC 5643 e NGC 3393 podem ser vistas na Figura B2 do trabalho de [Gómez-Guijarro et al. \(2017\)](#).

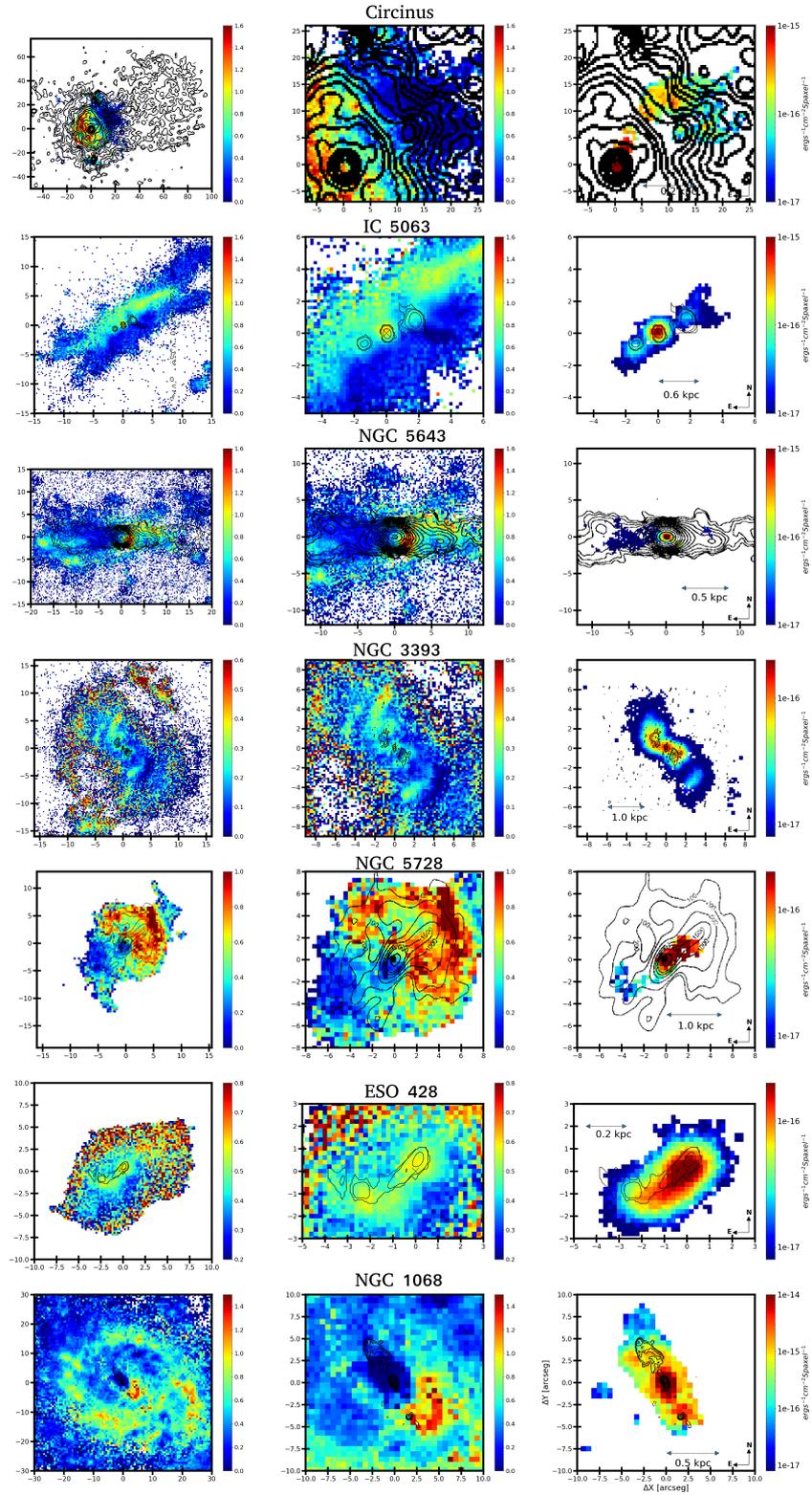
Em NGC 5728 a emissão em raio-X é identificada na região nuclear e em duas regiões estendidas. A primeira no sentido SE (até 1,2 kpc do AGN) e a segunda ao NO (até 700 pc do AGN). Em ambos os casos essa emissão está espacialmente associada à emissão de [Fe VII] (apresentada em [Durré e Mould \(2018b\)](#)).

A galáxia ESO 428 apresenta emissão estendida em raio-X na direção SE-NO, sendo a emissão SE coincidente com a emissão coronal. A emissão NO encontra-se mais estendida, possuindo o dobro da extensão que a de [Fe VII]. Em [Fabbiano et al.](#)

(2018), os autores modelaram a emissão raio-X estendida e encontraram que o melhor ajuste consiste da contribuição de um modelo de fotoionização mais um modelo térmico. Este último sugere a presença de choques de pelo menos algumas centenas de  $\text{km s}^{-1}$  desde o núcleo até distâncias de 900 pc. Os autores propõem que esses choques podem ser originados pela interação do jato rádio-emissor com o ISM.

O caso de NGC 1068 não é muito diferente dos apresentados acima. Este objeto possui emissão em raio-X desde a região nuclear até  $\sim 5$  kpc tanto no sentido sudoeste quanto a nordeste do AGN. A emissão em raio-X encontra-se na mesma direção que a emissão coronal, porém, esta última estende-se até 50% da distância em relação a primeira (ver Figura 18 do trabalho de Young et al. (2001)). Wang et al. (2012) estudaram com detalhe a emissão de raio-X desta galáxia em escalas de sub-segundos de arco. Baseado em observações combinadas de raio-X, [O III] e rádio, os autores identificaram locais de forte interação de jato/nuvem em “knots” localizados até  $1,3'' - 1,5''$  a noroeste e sudoeste do AGN. Algumas dessas nuvens estão fortemente afetadas por aquecimento via choques.

Figura 5.9 - Mapas de extinção com contornos em rádio.



Mapas de extinção (mapas da esquerda), mapas de extinção focado na região coronal (mapas da coluna central) e mapas dos fluxos de [Fe VII] (mapas da coluna da direita), todos os mapas possuem contornos em preto da emissão Rádio.



## 6 PROPRIEDADES FÍSICAS DO GÁS

No capítulo anterior, coletamos evidência observacional de emissão coronal estendida em escalas de quiloparsecs na maior parte dos objetos da nossa amostra. A fim de pesquisar sobre a natureza desse gás, a fonte de ionização e suas condições físicas, este capítulo visa derivar informações físicas tais como grau de ionização, temperatura, densidade e cinemática. Também, pretendemos caracterizar os parâmetros básicos dos *outflows* (taxa, massa e potência cinética).

### 6.1 Grau de ionização do gás

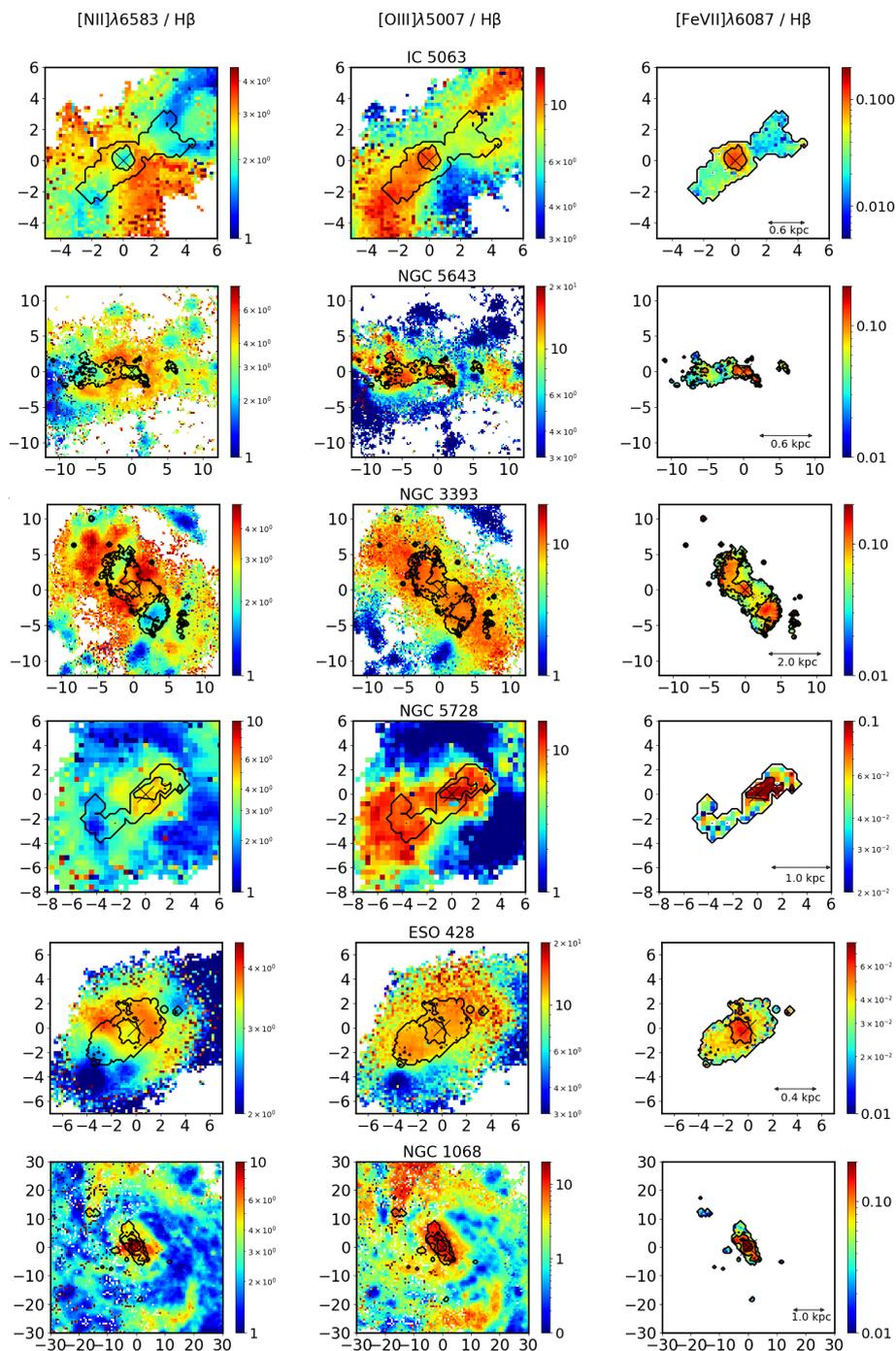
Estudos do grau de ionização de uma nuvem de gás visam determinar a natureza da fonte de fótons que a ilumina. Para isso, utilizam-se razões de linhas entre íons, usualmente do mesmo elemento ou relativos ao hidrogênio, para evitar potenciais vieses introduzidos pela metalicidade ou diferenças em densidade crítica das transições envolvidas. Com esse fim utilizaremos neste trabalho as linhas de [N II]  $\lambda 6583$ , [O III]  $\lambda 5007$  e [Fe VII]  $\lambda 6087$  como representativas de baixa, média, e alta ionização do gás, respectivamente.

Na Figura 6.1, são apresentadas as razões de linhas [N II]  $\lambda 6583 / H\beta$  (coluna da esquerda), [O III]  $\lambda 5007 / H\beta$  (coluna central) e [Fe VII]  $\lambda 6087 / H\beta$  (coluna da direita) para as 6 galáxias estudadas nesta seção. Para fins de comparação, foram sobrepostos contornos em preto, que representam valores da razão [Fe VII]  $\lambda 6087 / H\beta$  nos lugares onde esta pode ser determinada. O intuito é comparar a extensão e a variação dos valores de cada razão com a parcela de gás de alta ionização na região estendida dos AGNs. O nome de cada galáxia encontra-se anotado na parte superior dos painéis da coluna central. Para simplificar, ao longo deste capítulo vamos nos referir às razões acima por [N II] /  $H\beta$ , [O III] /  $H\beta$  e [Fe VII] /  $H\beta$ , respectivamente.

Similar ao observado em Circinus (ver Capítulo 4), IC 5063, NGC 5643 e NGC 3393 apresentam altos valores de [O III] /  $H\beta$  ( $> 6$ ) na região que é co-espacial ao [Fe VII]. Nesses três AGNs, a emissão tanto de [O III] quanto de [Fe VII] está majoritariamente confinada em uma estrutura associada com o cone de ionização. Nesses mesmos objetos, [N II] /  $H\beta$  atinge valores mais elevados na direção perpendicular ao eixo onde o gás emissor de oxigênio e ferro ionizado está distribuído. É importante mencionar que em todos esses casos, a emissão de [Fe VII] é mais compacta que a de [O III].

Em IC 5063, NGC 5643, NGC 5728 e ESO 428, [Fe VII] /  $H\beta$  é máxima no núcleo, com valores entre 0,06 e 0,1. Fora deste, o valor da razão diminui em menos de um dex,

Figura 6.1 - Mapas de razões de linhas para as galáxias.



Mapas das razões de linhas para as galáxias: IC 5063, NGC 5643, NGC 3393, NGC 5728, ESO 428 e NGC 1068. Apresentamos a razão  $[NII]\lambda 6583 / H\beta$  (mapas da coluna da esquerda),  $[OIII]\lambda 5007 / H\beta$  (mapas da coluna central) e  $[FeVII]\lambda 6087 / H\beta$  (mapas da coluna da direita). Os contornos em preto para cada mapa representam a razão de  $[FeVII]\lambda 6087 / H\beta$  de sua respectiva galáxia.

permanecendo bastante homogêneo, com valores entre 0,02 e 0,05, independente da distância ao núcleo.

Por outro lado, em NGC 3393,  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  apresenta valores médios de 0,1 em três regiões: no núcleo, ao longo da parte superior da estrutura em forma de “S” a nordeste do AGN e na nuvem localizada a 1,5 kpc ao sudoeste da fonte central. Nas demais regiões de  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  possuem valores entre 0,01 a 0,06. Note que na região sudoeste, a 1,2 kpc do AGN,  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  atinge o valor mais alto identificado nesse objeto (0,11). Nessa mesma região, encontramos também emissão estendida de  $[\text{Fe X}]$ . Não encontramos na literatura nenhum resultado prévio que aponte para valores tão altos de  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  a tais distâncias da fonte central.

NGC 1068 apresenta valores relativamente constantes de  $[\text{O III}] / \text{H}\beta$  ( $\sim 10$ ) em toda a região co-espacial com  $[\text{Fe VII}]$ . Além disso,  $[\text{O III}] / \text{H}\beta$  possui altos valores ( $\sim 6$ ) em duas regiões mais estendidas ao norte e ao sul, a 2,5 kpc do AGN. O diagrama BPT indica que ambas as regiões são ionizadas pelo AGN (ver Figura 5.8). Similarmente ao observado na maior parte das galáxias,  $[\text{N II}] / \text{H}\beta$  possui valor máximo no núcleo e preferencialmente na direção leste-oeste, fora da região onde  $[\text{Fe VII}]$  é detectado.

Note que em NGC 1068,  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  apresenta os maiores valores medidos nessa razão da amostra, atingindo valores maiores que 0,2 na região central. Também, nessa mesma razão, observamos uma segunda estrutura, que inicia em 150 pc e que se estende até 500 pc na direção NE do AGN, com valores de  $\sim 0,1$ . Nas bordas dessa região o valor da razão decresce até 0,05. Ao sul do AGN,  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  apresenta valores médios de 0,03. Essa região é co-espacial com a máxima extensão de  $[\text{Fe X}]$  apresentada na Figura 5.6.

Em ESO 428, os valores mais elevados de  $[\text{O III}] / \text{H}\beta$  ( $\sim 20$ ) são observados a distâncias superiores a 400 pc a NO do AGN. O início dessa região coincide com o limite onde a emissão de  $[\text{Fe VII}]$  é detectada. Já  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  tem um máximo ao SE, bem próximo da posição do AGN. Na região estendida, o valor da razão permanece relativamente constante.

De modo geral, as razões de linhas estudadas aqui indicam que regiões com alto grau de ionização estão associadas aos cones de ionização. A comparação da Figura 6.1 com os mapas rádio apresentados no capítulo anterior nos permite concluir que essas regiões altamente ionizadas estão alinhadas com o jato rádio. Valores máximos de  $[\text{O III}] / \text{H}\beta$  e  $[\text{Fe VII}] / \text{H}\beta$  são encontrados no núcleo e ao longo do jato rádio-emissor. Em contraste,  $[\text{N II}] / \text{H}\beta$  apresenta valores máximos nas regiões fora do

cone, perpendicular à direção de propagação do jato. Baixos valores dessa razão são identificados nos locais onde o [Fe VII] é observado.

Os nossos resultados suportam a hipótese de que a fonte central não pode ser o principal mecanismo de ionização do gás coronal estendido. Isso por causa dos altos valores da razão [Fe VII] /  $H\beta$  medidos a distâncias de centenas de parsecs do AGN, similares aos encontrados no núcleo. Esse é o caso observado em Circinus, NGC 3393, NGC 5643 e NGC 1068.

A emissão de [Fe VII], além de mais compacta que a do [O III], é consideravelmente mais colimada que esta última. Pelo fato de as linhas coronais não serem produzidas por processos estelares, os resultados mostram que esta emissão traça, de forma não ambígua, a região de mais alta ionização dentro do cone. É possível que gás coronal ainda mais estendido possa existir. Porém, observações mais profundas seriam necessárias para confirmar essa hipótese.

## 6.2 Cinemática do gás

Na seção anterior, encontramos que a ionização do gás nas galáxias da amostra aumenta conforme nos aproximamos do eixo do jato, sendo máxima ao longo deste ou na posição do AGN. De fato, Circinus, NGC 3393, NGC 5643 e NGC 1068 apresentam picos de emissão de [Fe VII] da mesma ordem de intensidade que aquela medida no núcleo, em pontos localizados a centenas de parsecs do AGN. Segundo [Ferguson et al. \(1997\)](#), fotoionização pela fonte central não pode explicar esse comportamento. É esperado que a ionização do gás diminua com a distância. Para fontes com  $L_{\text{bol}}$  da ordem ou menor que  $10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ , linhas coronais não poderiam ser formadas em distâncias acima de 150 pc se considerarmos apenas o efeito da fonte central. Portanto, mecanismos de excitação local devem estar produzindo um aumento da ionização do gás ao longo da direção onde o [Fe VII] é observado.

Para confirmar a hipótese de que efeitos locais são responsáveis pelo aumento da ionização do gás, revisaremos a cinemática na região central das galáxias. Isso nos permitirá coletar evidência adicional sobre a fonte de excitação do gás coronal e do *outflow* em geral. Para atingir esse objetivo, é necessário primeiro determinar se o gás ionizado está em rotação, acoplado cinematicamente ao disco da galáxia. Com esse intuito, utilizaremos mapas de velocidade construídos para a linha de  $H\alpha$  e o modelo de rotação de um disco definido pela Equação 4.3. Repare que só a componente mais estreita dessa linha será utilizada no ajuste do modelo. Isso porque essa componente está presente na maior parte do campo do MUSE e, em geral, está mais relacionada

com a emissão do disco. Contudo, já que em algumas regiões  $H\alpha$  apresenta uma componente larga, possivelmente vinculada com o *outflow*, pretendemos comparar o campo de velocidade dessa parcela de gás com a encontrada para o disco.

Apresentaremos também mapas de canais (ou tomogramas), os quais permitem examinar o campo de velocidades de um gás distribuído espacialmente. Essa técnica consiste em fatiar uma determinada linha de emissão em *bins* de velocidade, de modo que cada *bin* ou tomograma mostra as regiões que simultaneamente apresentam uma velocidade dada. Já que o nosso objetivo é examinar o comportamento do gás estendido de alta ionização, utilizaremos a linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  como representativa desse gás. No processo de fatiamento, assumimos o *bin* mínimo dos espectros como intervalo entre os canais. Nos espectros MUSE, isso corresponde a  $\Delta\lambda = 1,25 \text{ \AA}$  ou  $61,5 \text{ km s}^{-1}$  no espaço de velocidade. Nos tomogramas os fluxos de linha são medidos se estes possuem no mínimo duas vezes mais fluxo que o desvio padrão em uma região de céu do espectro. A região do céu adotada possui uma largura de  $\sim 30 \text{ \AA}$  antes e depois da região onde é identificada a linha de emissão de  $[\text{Fe VII}]$ . A seguir, detalhamos os resultados mais relevantes encontrados para cada galáxia da amostra.

### 6.2.1 IC 5063

A primeira linha da Figura 6.2 apresenta o mapa de velocidade de  $H\alpha$  para as componentes estreita (coluna da esquerda) e larga (coluna central) da linha em emissão detectada em IC 5063. O melhor ajuste do modelo de rotação da componente estreita de  $H\alpha$  encontra-se no painel da coluna da direita. Nos painéis da esquerda e central da segunda linha apresentamos os mapas de resíduos (velocidade observada subtraída do modelo de rotação) para a componente estreita e larga de  $H\alpha$ , respectivamente. Os quatro painéis restantes (direita da segunda linha e os três da última linha) apresentam, respectivamente, a velocidade das componentes azul e vermelha da linha de  $[\text{Fe VII}]$  e seus respectivos mapas de FWHM. Os contornos em preto delimitam a região onde a emissão de  $[\text{Fe VII}]$  é detectada. Os mapas de velocidades de  $[\text{Fe VII}]$  apresentam a velocidade já subtraída do modelo de rotação ajustado.

A partir dos dados de velocidade da componente estreita de  $H\alpha$ , verifica-se que em uma região circular centrada no núcleo e com raio de  $5''$  o movimento do gás é altamente complexo e não segue a rotação do disco. Fora dessa região central, o modelo de rotação utilizado reproduz satisfatoriamente o movimento desse gás. O mapa de resíduo para a componente larga de  $H\alpha$  mostra um comportamento semelhante. Resíduos em excesso de  $200 \text{ km s}^{-1}$  em relação à rotação do gás são

observados. É importante ressaltar que as regiões onde o gás emissor de  $H\alpha$  está mais fortemente perturbado coincidem espacialmente com os 2 spots rádio, a sudeste e noroeste do AGN. Esse comportamento corrobora a hipótese de uma interação entre o jato e o meio interestelar inflando uma bolha nessa região.

Os mapas de velocidades de  $[\text{Fe VII}]$  mostram que essa linha apresenta duplo pico principalmente na região nuclear. O gás está desacoplado da rotação do disco de gás ionizado. De fato, movimentos em excesso de até  $400 \text{ km s}^{-1}$  em relação à rotação do gás são identificados e coincidentes com a posição dos rádio-nós. Nessas mesmas posições são identificados altos valores de FWHM, de até  $500 \text{ km s}^{-1}$ , que coincidem com altos valores de fluxos de  $[\text{Fe VII}]$  (ver Figura 6.2). Esses resultados indicam a presença de um gás em expansão e altamente turbulento.

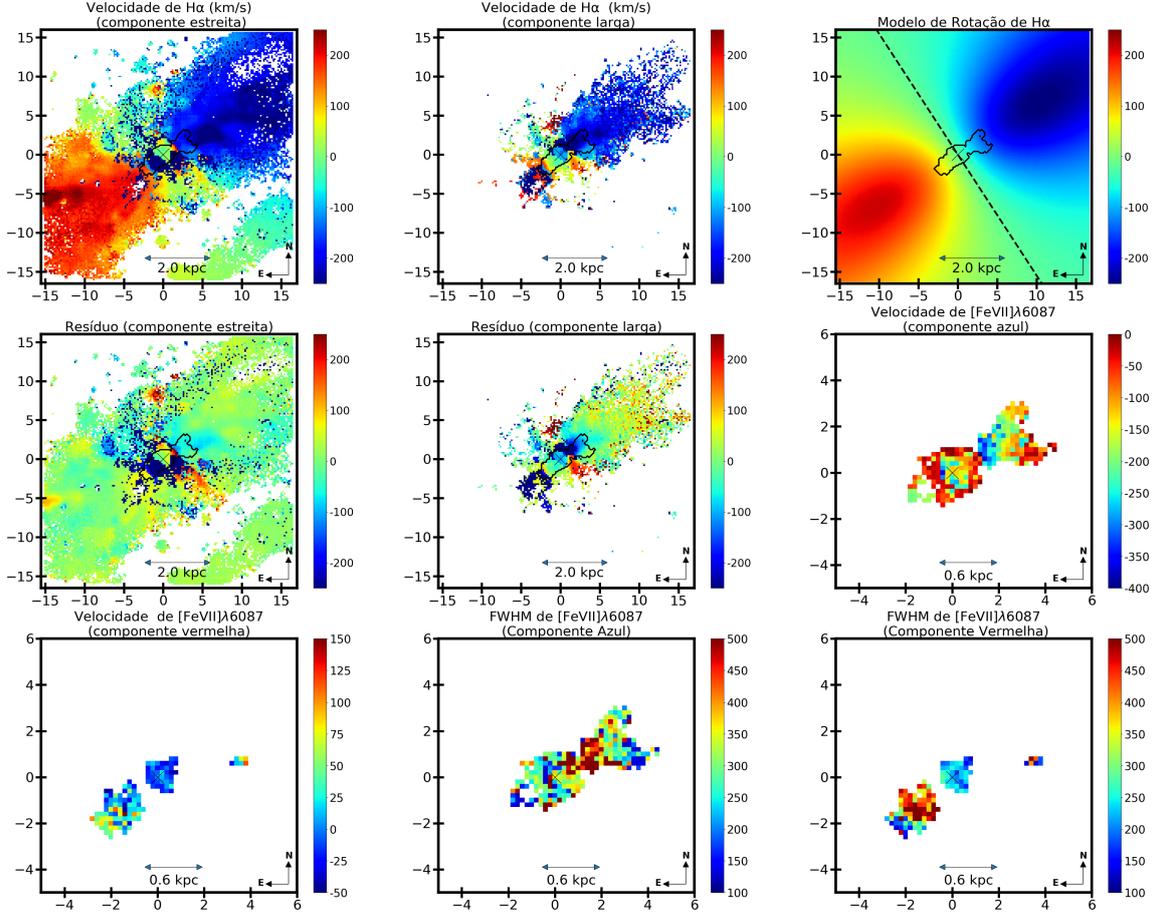
Nos mapas de canais da IC 5063 (ver Figura 6.3), verificamos uma estrutura estendida na direção sudeste-noroeste do AGN com três picos em emissão: no núcleo; em 500 pc a noroeste e em 400 pc a sudeste. Na região nuclear,  $[\text{Fe VII}]$  apresenta um perfil fortemente alargado e com assimetria na asa azul, sendo identificado entre os canais  $-435 \text{ km s}^{-1}$  e  $356 \text{ km s}^{-1}$ . Essa região possui o maior intervalo de canais entre os três picos de emissão comentados acima. A estrutura a noroeste possui preferencialmente velocidades negativas, sendo observada entre os canais  $-617 \text{ km s}^{-1}$  e  $51 \text{ km s}^{-1}$ . O pico de emissão a sudeste está constituído de gás que se afasta do observador, sendo identificado entre os canais  $-191 \text{ km s}^{-1}$  e  $538 \text{ km s}^{-1}$ .

### 6.2.2 NGC 5643

Em NGC 5643, o mapa de resíduo de velocidade para a componente estreita de  $H\alpha$  (ver Figura 6.4) mostra que o gás está acompanhando a rotação do disco, exceto na região mais interna ( $r < 4''$ ). A componente larga apresenta estruturas com velocidades desacopladas do modelo de rotação ( $V \sim -100 \text{ km s}^{-1}$ ) em diversas regiões a oeste e ao sul do AGN. A leste do AGN, a emissão que é co-espacial com  $[\text{Fe VII}]$  possui velocidades predominantemente positivas ( $V \sim 30 \text{ km s}^{-1}$ ). Concluímos que esta parcela de gás está em movimento de *outflow*, se afastando do observador.

Os mapas de velocidade para linha de  $[\text{Fe VII}]$  indicam perfis de duplo pico, principalmente na região nuclear. Na região estendida, a leste do AGN, identificamos que o gás coronal se encontra em movimento de expansão lateral. Essa conclusão baseia-se na predominância de gás com velocidades positivas ao norte e velocidades negativas ao sul, ao longo da estrutura estendida. As amplitudes dessas velocidades são de  $-100 \text{ km s}^{-1}$  e  $80 \text{ km s}^{-1}$ , respectivamente. Repare que ao longo da estrutura a

Figura 6.2 - Mapas da cinemática do gás de IC 5063.

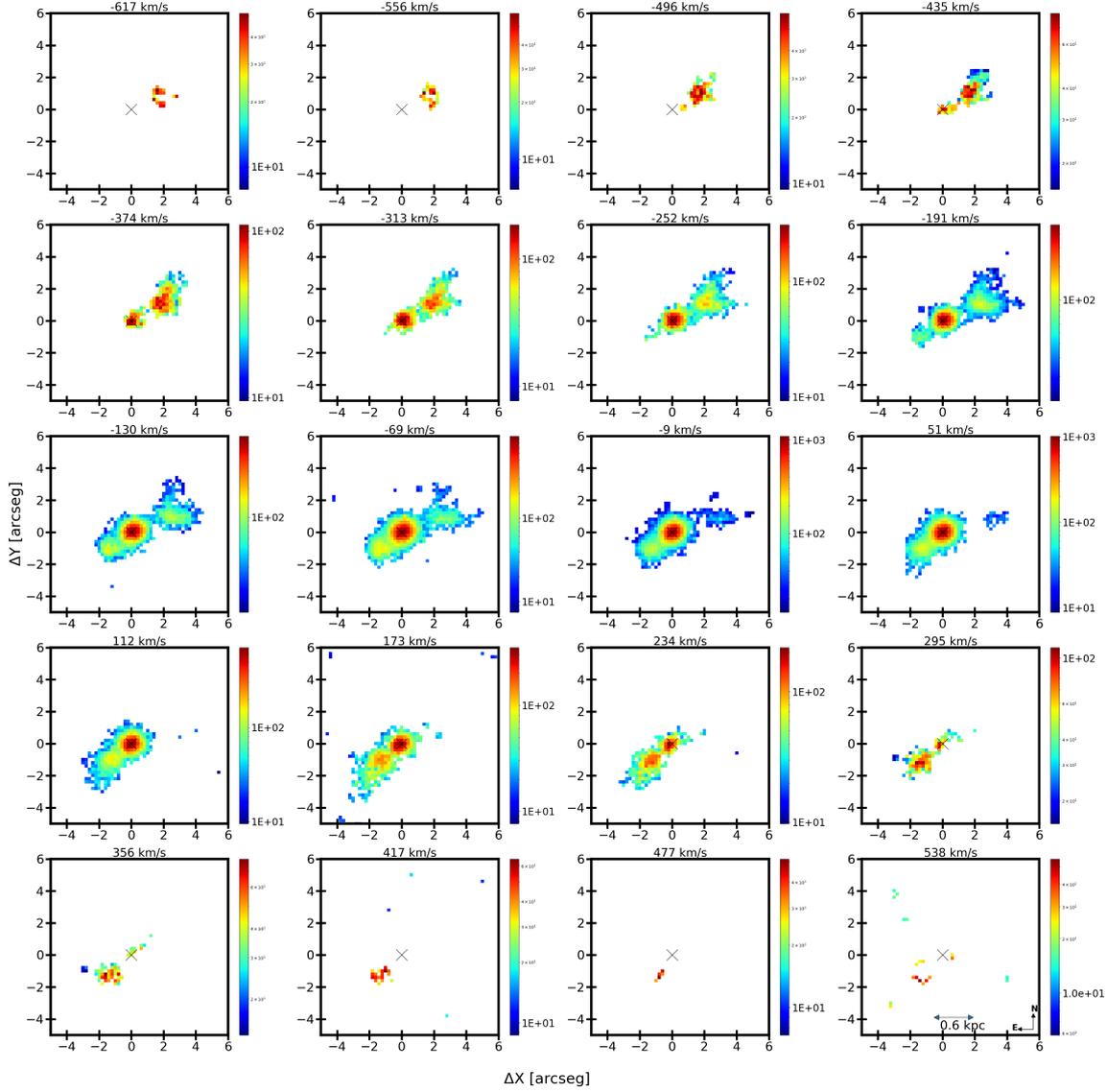


Na primeira linha apresentamos respectivamente, mapa de velocidade para componente estreita de  $H\alpha$ , mapa de velocidade para componente larga de  $H\alpha$  e o modelo de rotação ajustado para componente estreita de  $H\alpha$ . Na segunda linha apresentamos mapa de resíduos para componente estreita de  $H\alpha$ , mapa de resíduos para componente larga de  $H\alpha$  e na terceira coluna mapa de velocidades de  $[\text{Fe VII}]$  (componente azul). Na terceira fileira apresentamos o mapa de velocidades de  $[\text{Fe VII}]$  (componente vermelha), mapa de FWHMs de  $[\text{Fe VII}]$  (componente azul) e mapa de FWHMs de  $[\text{Fe VII}]$  (componente vermelha). Os resíduos apresentados são da velocidade observada subtraída pelo modelo de rotação ajustado para linha de  $H\alpha$ . Nos mapas do modelo de rotação é apresentado uma linha seccionada indicando o  $\Psi_0$  do ajuste. Nos mapas de resíduo foram adicionados contornos da região de emissão  $[\text{Fe VII}]$ .

leste, o gás é altamente turbulento, com valores de  $\text{FWHM} \sim 280 \text{ km s}^{-1}$ . Contudo, o gás emissor de  $[\text{Fe VII}]$  apresenta os maiores valores de turbulência na região nuclear ( $r < 200 \text{ pc}$  do AGN) com valores de  $\text{FWHM} > 600 \text{ km s}^{-1}$ .

Os mapas de canais na Figura 6.5 corroboram com os resultados indicados acima.

Figura 6.3 - Mapas de canais para emissão coronal da galáxia IC 5063.

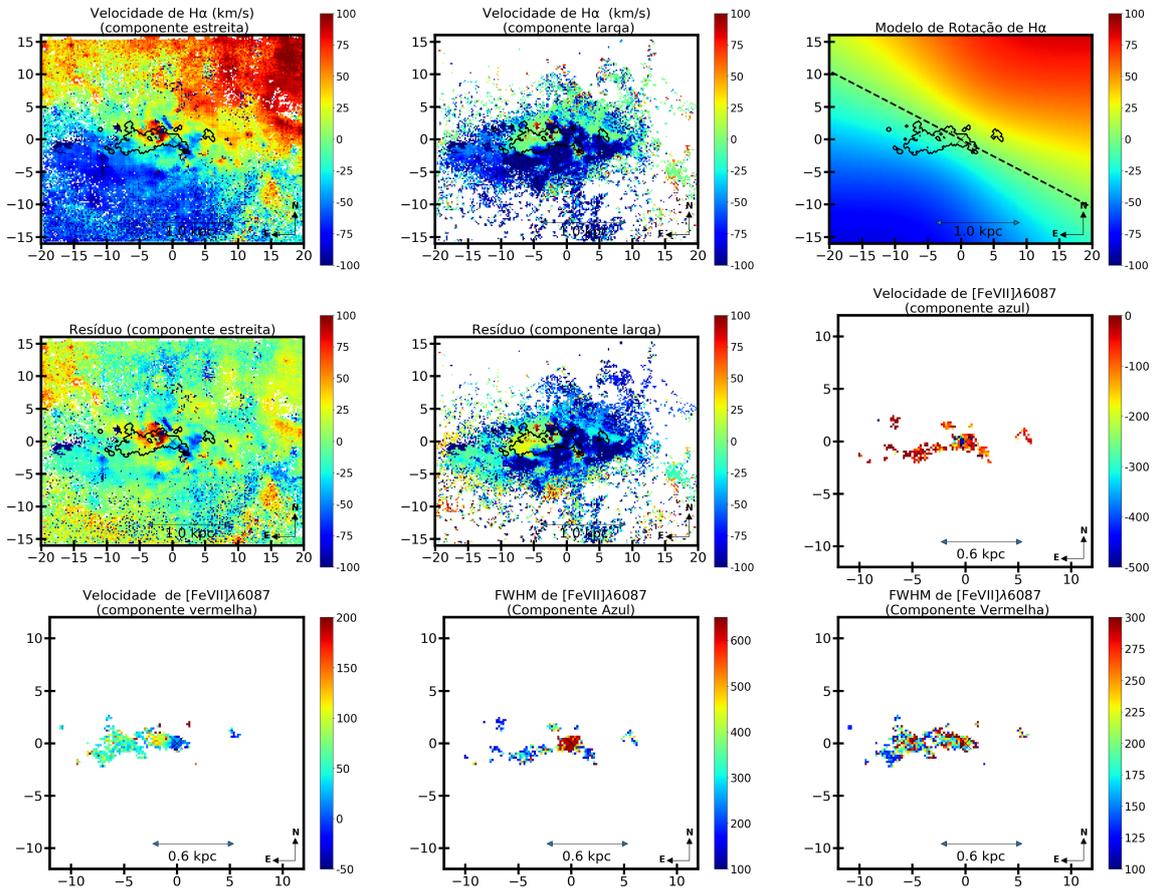


Mapas de canais da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  para a galáxia IC 5063. Os fluxos são apresentados em unidades de  $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ .

O gás coronal estendido se distribui na direção leste-oeste, alinhado com a emissão rádio. Na emissão a leste do AGN é identificada a maior parte do gás coronal. A região que coincide com a posição do AGN é a que apresenta a maior turbulência, sendo identificada nos canais de  $-643 \text{ km s}^{-1}$  a  $521 \text{ km s}^{-1}$ . As estruturas mais estendidas ( $> 200 \text{ pc}$  do AGN), observadas a leste e oeste, são identificadas entre os canais  $-152 \text{ km s}^{-1}$  e  $214 \text{ km s}^{-1}$ . A estrutura ao leste inicia-se na região nuclear e estende-se até  $850 \text{ pc}$  do AGN. A estrutura a oeste separada do núcleo é visualizada de forma mais clara nos canais  $-30 \text{ km s}^{-1}$  e  $30 \text{ km s}^{-1}$ . Provavelmente representa

uma parcela do gás ejetada pelo núcleo com velocidade relativa à galáxia próxima de zero.

Figura 6.4 - Mapas da cinemática do gás de NGC 5643.

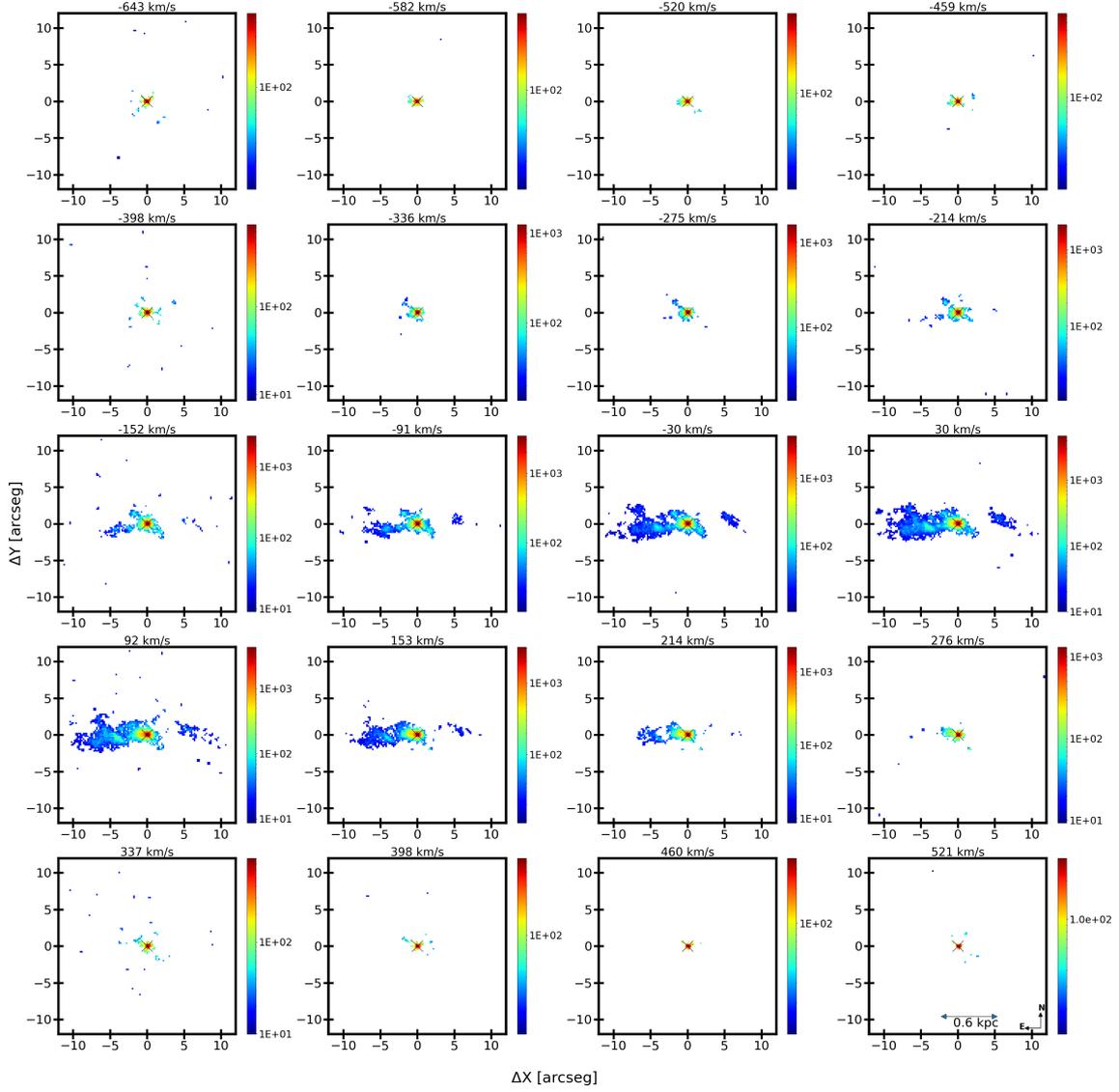


Igual à Figura 6.2 para a NGC 5643.

### 6.2.3 NGC 3393

Na Figura 6.6, apresentamos detalhes da cinemática de NGC 3393. Nota-se que a maior parte do hidrogênio ionizado (componente estreita) que está co-espaial com a emissão coronal encontra-se seguindo a rotação do disco da galáxia. Porém, no mapa de resíduos é evidente a presença de duas regiões desacopladas dessa rotação. A primeira, a leste do AGN, traça um arco na direção sul com velocidades em excesso da rotação do gás entre  $50 \text{ km s}^{-1}$  e  $120 \text{ km s}^{-1}$ . A segunda se situa  $\sim 1 \text{ kpc}$  a sudoeste do núcleo com velocidades em excesso de  $100 \text{ km s}^{-1}$ . É importante ressaltar que essas duas regiões estão espacialmente associadas com a borda da emissão rádio. Isso sugere gás em expansão devido à compressão do jato no meio interestelar. Para a

Figura 6.5 - Mapas de canais para emissão coronal da galáxia NGC 5643.



Mapas de canais da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  para a galáxia NGC 5643. Os fluxos são apresentados em unidades de  $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ .

componente larga de  $\text{H}\alpha$  observamos gás com movimentos não circulares em relação ao modelo cinemático ajustado. A estrutura com maiores valores de resíduo encontra-se alinhada com a emissão coronal e está dominada por componentes de velocidade negativa a NE do AGN. Por outro lado, no sentido sudoeste existe domínio das componentes de velocidades residuais positivas. Isso indica que a componente larga de  $\text{H}\alpha$  está claramente associada com o cone de ionização observado nesse objeto. Ainda a sudoeste do AGN, identificamos três estruturas com velocidade residual de  $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ , localizadas a 400, 2000 e 3000 pc do AGN. Esta última posição

coincide com a máxima extensão do gás emissor de [Fe VII].

Os mapas de velocidades para a emissão coronal em NGC 3393 apresentam linhas de [Fe VII] com duplo pico na maior parte dos spaxels onde essa linha é detectada. O gás emissor apresenta velocidades dentro do intervalo de  $-350 \text{ km s}^{-1}$  a  $100 \text{ km s}^{-1}$ . Identificamos uma semelhança entre a velocidade da linha de [Fe VII] e a componente larga de  $\text{H}\alpha$ , confirmando nossa suposição inicial de que a componente larga desta última linha está associada ao cone de ionização.

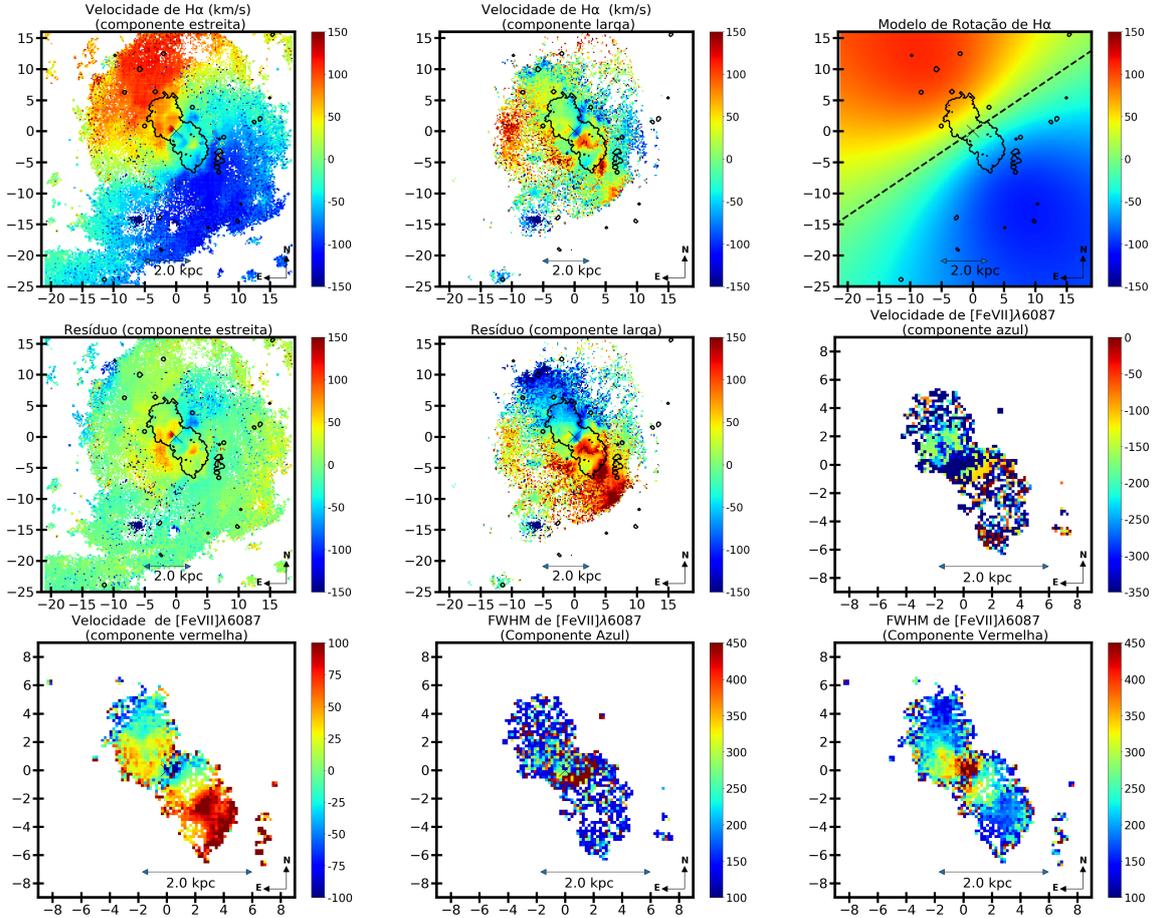
A emissão coronal apresenta altos valores de FWHM na região nuclear (componente vermelha) e na direção NE – SO (componente azul) principalmente a 300 pc a sul do AGN. Em ambas as regiões são observados valores de FWHM próximos a  $400 \text{ km s}^{-1}$ , nas bordas da emissão rádio, apontando para um gás altamente turbulento. Na componente vermelha, existe gás estendido, associado à estrutura em forma de “S”, onde são observadas linhas com valores de FWHM de  $\sim 300 \text{ km s}^{-1}$ , o que reflete fortemente a interação entre o jato e o gás do ISM, no cone de ionização.

A complexa cinemática do gás ionizado em NGC 3393 pode ser melhor visualizada na Figura 6.7, apresentada para a linha de [Fe VII] pela primeira vez na literatura. Identificamos a emissão coronal associada ao AGN em todos os canais apresentados. Percebe-se uma estrutura estendida na direção NE – SO, localizada até 300 pc do AGN, identificada entre os canais  $-407 \text{ km s}^{-1}$  e  $565 \text{ km s}^{-1}$ . Essa estrutura é mais intensa que a emissão do núcleo nos canais com velocidades positivas mais elevadas, entre  $443 \text{ km s}^{-1}$  e  $565 \text{ km s}^{-1}$ . A estrutura em formato de “S” típica desse objeto é realçada nos canais entre  $-164 \text{ km s}^{-1}$  até o  $504 \text{ km s}^{-1}$ . A região mais intensa dessa estrutura ‘S’ ( $F_\lambda > 2,0 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ ) está espacialmente associada à emissão rádio da galáxia. A região mais estendida de emissão coronal, a 2,5 kpc do AGN no sentido SO, encontra-se preferencialmente nos canais com velocidades próximas da velocidade sistêmica da galáxia. Identificamos essa emissão entre os canais  $-43 \text{ km s}^{-1}$  e  $78 \text{ km s}^{-1}$ . É possível que represente emissão localizada no disco, chocado pelo efeito do jato.

#### 6.2.4 NGC 5728

Apresentamos na Figura 6.8 os detalhes da cinemática de NGC 5728. O mapa de velocidade residual da componente estreita de  $\text{H}\alpha$  indica que a maior parte do gás está em um disco em rotação, exceto na região próxima ao núcleo ( $r < 500 \text{ pc}$ ) e em duas estruturas estendidas a leste ( $r \sim 1,6 \text{ kpc}$ ) e a oeste ( $r \sim 2,0 \text{ kpc}$ ) do AGN. Essas estruturas possuem excessos de velocidade maiores que  $-100 \text{ km s}^{-1}$  em relação à

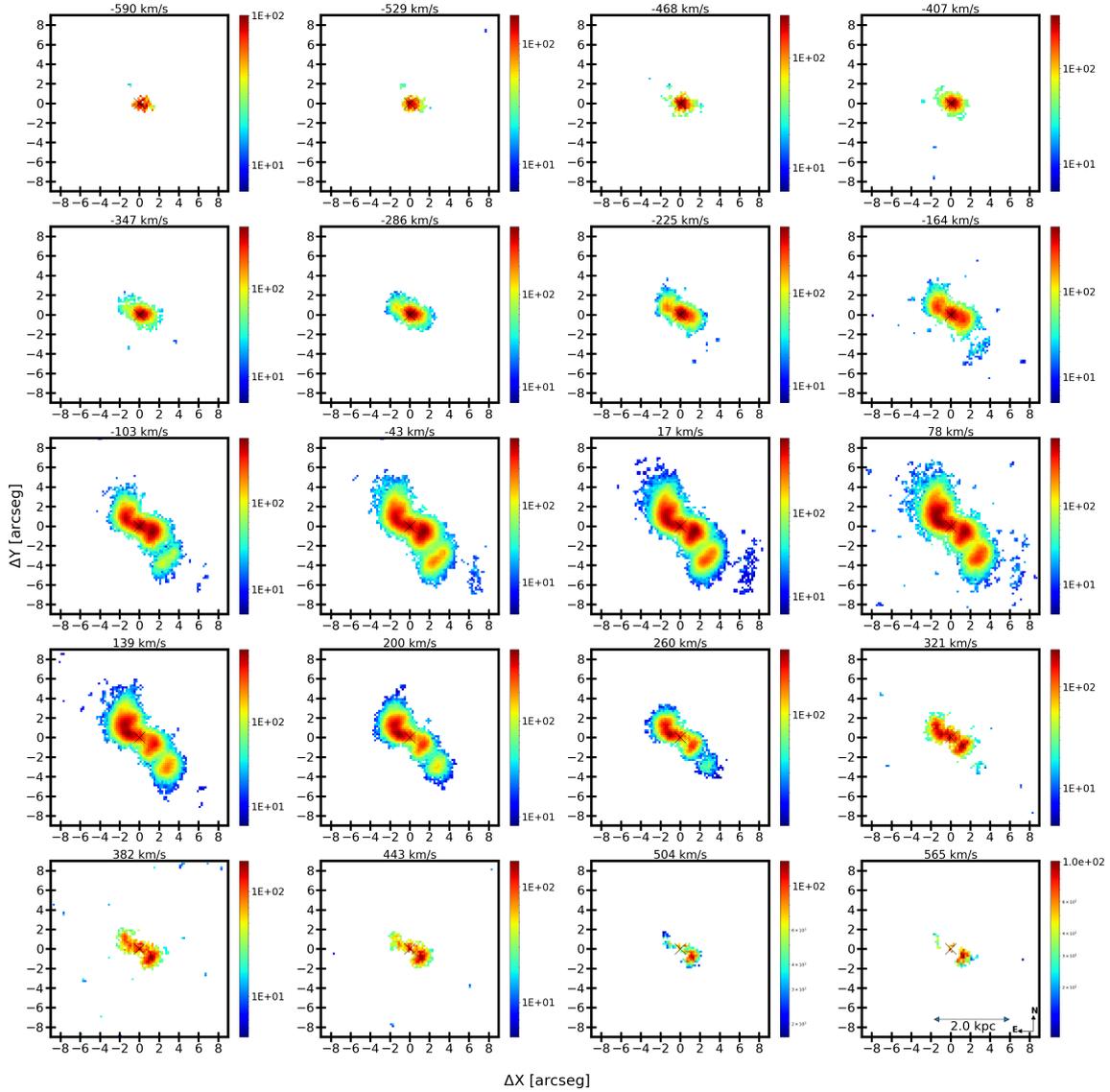
Figura 6.6 - Mapas da cinemática do gás de NGC 3393



Igual à Figura 6.2 para a NGC 3393.

velocidade do disco e estão associadas aos limites do cone de ionização. Existe ainda uma terceira estrutura com velocidade de  $\Delta V > -100 \text{ km s}^{-1}$  observada no sentido NE que está associado a borda lateral do cone. A borda oeste do cone de ionização coincide com a máxima extensão de gás emissor de [Fe VII] (ver Figura 5.4), à distância de 2 kpc do AGN. Próximo ao núcleo encontramos duas regiões com velocidades positivas e negativas, a SE e NO do AGN, respectivamente. A estrutura a SE é observada até 200 pc do núcleo e possui velocidade em relação ao modelo de rotação de  $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ . A região NO, localizada entre  $\sim 200 \text{ pc}$  e  $\sim 400 \text{ pc}$  do AGN, associada com a borda lateral do cone, possui velocidade de  $\sim -150 \text{ km s}^{-1}$ . A componente larga de H $\alpha$  apresenta resíduos de velocidades negativas e positivas nas regiões próximas do AGN, em um raio de até 500 pc. Encontramos velocidades negativas em três regiões estendidas (distância  $> 600 \text{ pc}$  do AGN), nos sentidos nordeste, oeste e sudeste. Além disso, detectamos duas estruturas com velocidades

Figura 6.7 - Mapas de canais para emissão coronal da galáxia NGC 3393.



Mapas de canais da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  para a galáxia NGC 3393. Os fluxos são apresentados em unidades de  $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ .

positivas, a 3 kpc do AGN, tanto no sentido leste quanto ao noroeste.

O mapa de velocidades de  $[\text{Fe VII}]$  mostra que esta emissão não acompanha a da rotação do gás observada na componente estreita de  $\text{H}\alpha$ . Na Figura 6.8, observamos que a emissão coronal é estendida no sentido sudeste, com velocidades predominantemente positivas. Uma segunda estrutura estendida, porém, mais compacta que a primeira, é observada no sentido noroeste e caracterizada por velocidades negativas. É importante ressaltar que a emissão coronal é caracterizada por apenas uma

única componente espectral em praticamente todo o campo observado. Ao todo, a emissão estendida possui velocidades no intervalo de  $-350$  a  $280 \text{ km s}^{-1}$ . A região nuclear apresenta gás coronal com alta turbulência, com valores de FWHM de até  $400 \text{ km s}^{-1}$ . As estruturas estendidas possuem valores de FWHMs de  $\sim 220 \text{ km s}^{-1}$ .

Os mapas de canais obtidos para NGC 5728 são apresentados na Figura 6.9. Essa galáxia apresenta dois máximos de emissão na região nuclear. O primeiro coincide com a posição do núcleo, sendo identificado entre os canais  $-45 \text{ km s}^{-1}$  e  $564 \text{ km s}^{-1}$ . Adotamos esta posição como a localização do AGN. O segundo máximo é identificado na posição  $X = 2''$  e  $Y = 1,5''$  e é observado entre os canais  $-533 \text{ km s}^{-1}$  e  $-45 \text{ km s}^{-1}$ . Identificamos também uma região a sudeste, em formato de bolha, que se estende até  $1,2 \text{ kpc}$  do AGN, sendo detectada entre os canais  $-106 \text{ km s}^{-1}$  e  $259 \text{ km s}^{-1}$ . O extremo leste desta emissão estendida coincide com a borda do cone de ionização.

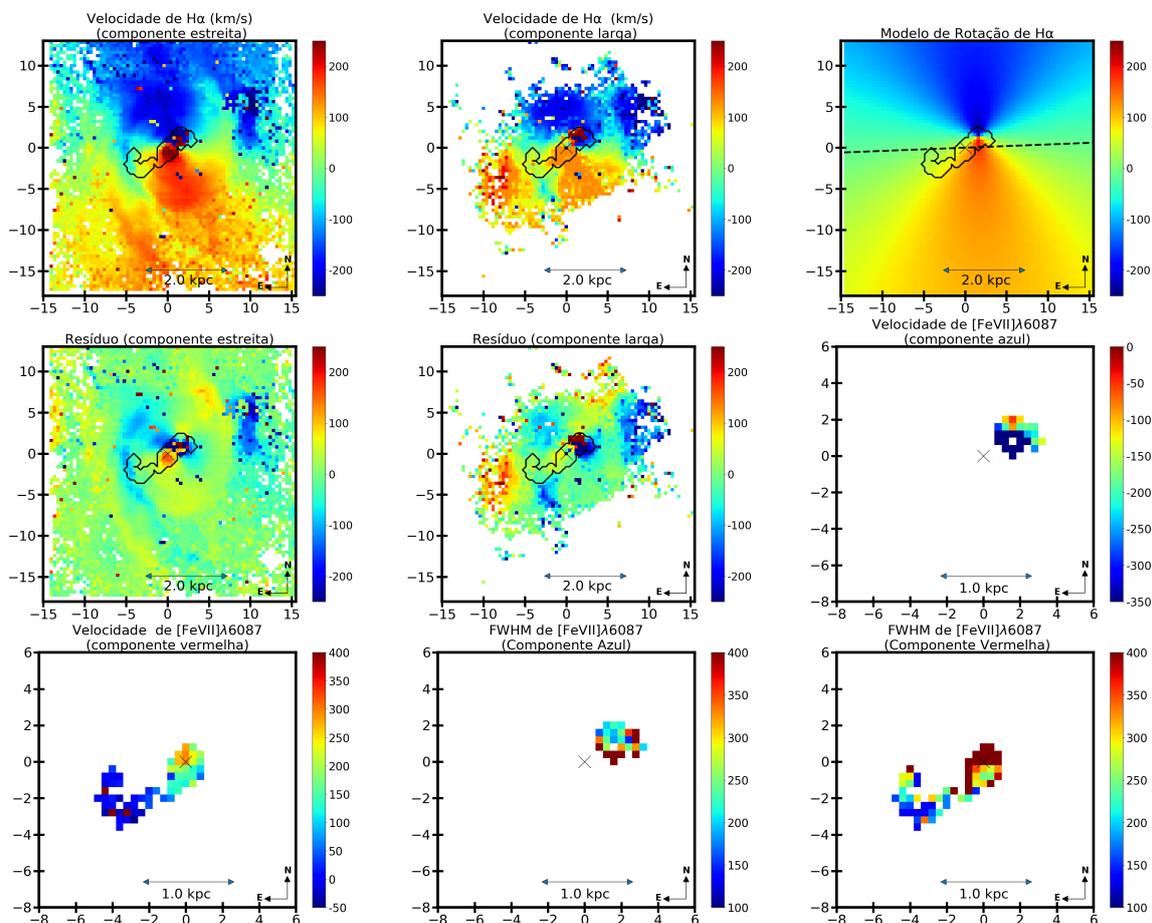
A morfologia do gás de [Fe VII] a sudeste, observada no mapa de velocidades da componente vermelha, coincide espacialmente com a região mais colimada do jato rádio-emissor (ver Figura 5.9). Nos mapas de canais, entre  $-106 \text{ km s}^{-1}$  e  $198 \text{ km s}^{-1}$ , é possível confirmar pela primeira vez na literatura, através de uma linha coronal, a parte mais ionizada do cone nessa galáxia. No sentido NO, a  $2 \text{ kpc}$  do AGN, detectamos emissão coronal com velocidades negativas, sendo identificadas apenas nos canais  $-228 \text{ km s}^{-1}$  e  $-167 \text{ km s}^{-1}$ . Essa emissão coincide com a região mais estendida da emissão coronal (ver Figura 5.4).

### 6.2.5 ESO 428

Em ESO 428, a velocidade da componente estreita de  $\text{H}\alpha$  está predominantemente associada ao disco da galáxia em praticamente em todo campo observado (ver Figura 6.10). Apenas observam-se resíduos da ordem de  $-80 \text{ km s}^{-1}$  nas proximidades do AGN. A componente larga de  $\text{H}\alpha$  segue a rotação do gás na região norte, noroeste e sudoeste. Já ao leste e sudoeste apresenta uma estrutura com velocidades negativas ( $\sim -100 \text{ km s}^{-1}$ ), principalmente na região onde identificamos emissão coronal.

Os mapas de velocidade da emissão coronal mostram que esta não segue a rotação do gás ionizado. Ainda, os perfis de linha apresentam duplo pico em mais de 50% dos spaxels. As velocidades destas componentes indicam movimentos de gás coronal no intervalo  $-200$  a  $100 \text{ km s}^{-1}$ . Essas linhas possuem FWHM elevados, da ordem de  $700 \text{ km s}^{-1}$ , em uma estrutura alongada na direção NO – SE, principalmente na componente vermelha. A componente azul apresenta valores de FWHMs  $\sim 400 \text{ km s}^{-1}$  desde a região nuclear até  $300 \text{ pc}$  nos sentidos norte e oeste do AGN. Os

Figura 6.8 - Mapas da cinemática do gás de NGC 5728.



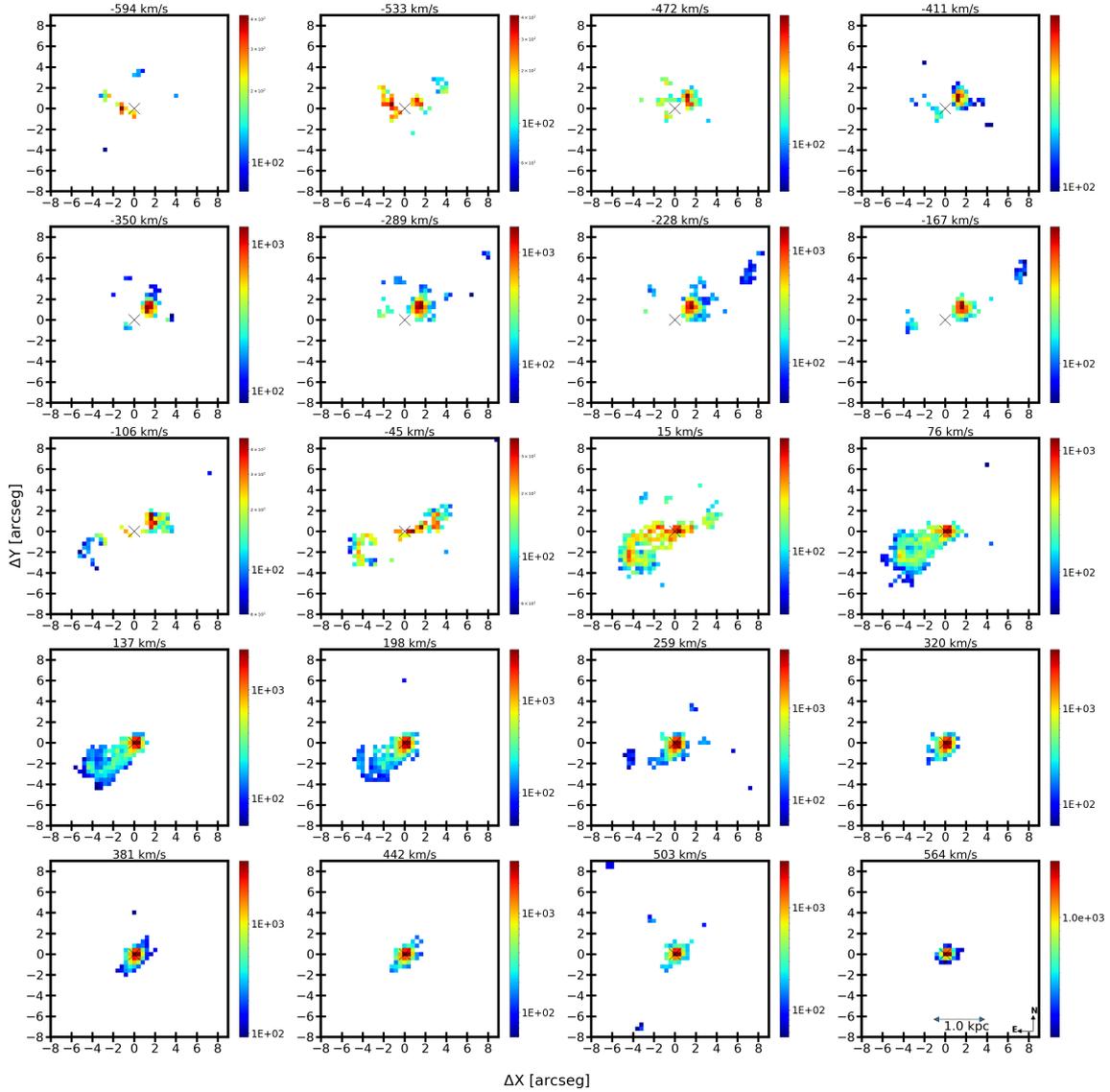
Igual à Figura 6.2 para a NGC 5728.

mapas sugerem gás coronal emissor com alta turbulência, principalmente ao longo da direção do jato rádio-emissor (ver Figura 5.9).

Na Figura 6.11, são apresentados os mapas de canais para emissão coronal da ESO 428. Identificamos emissão de  $[\text{Fe VII}]$  na região nuclear nos canais de  $-602$  a  $560 \text{ km s}^{-1}$ . Os contornos da emissão nuclear estão restritos a uma região circular nos canais entre  $-602 \text{ km s}^{-1}$  e  $-296 \text{ km s}^{-1}$ . Ainda, existe uma estrutura alongada no sentido SE, sendo identificada nos canais entre  $-234 \text{ km s}^{-1}$  e  $560 \text{ km s}^{-1}$ . Essa estrutura possui a máxima extensão coronal observada no canal de  $71 \text{ km s}^{-1}$ .

Percebe-se, em todos os canais, que a maior intensidade de emissão coronal está localizada na região nuclear, com os valores de fluxos diminuindo gradativamente em direção à borda da estrutura de emissão. Uma estrutura com fluxos maiores que  $3 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$  é identificada nos canais de  $9 \text{ km s}^{-1}$ ,  $71 \text{ km s}^{-1}$  e

Figura 6.9 - Mapas de canais para emissão coronal da galáxia NGC 5728.



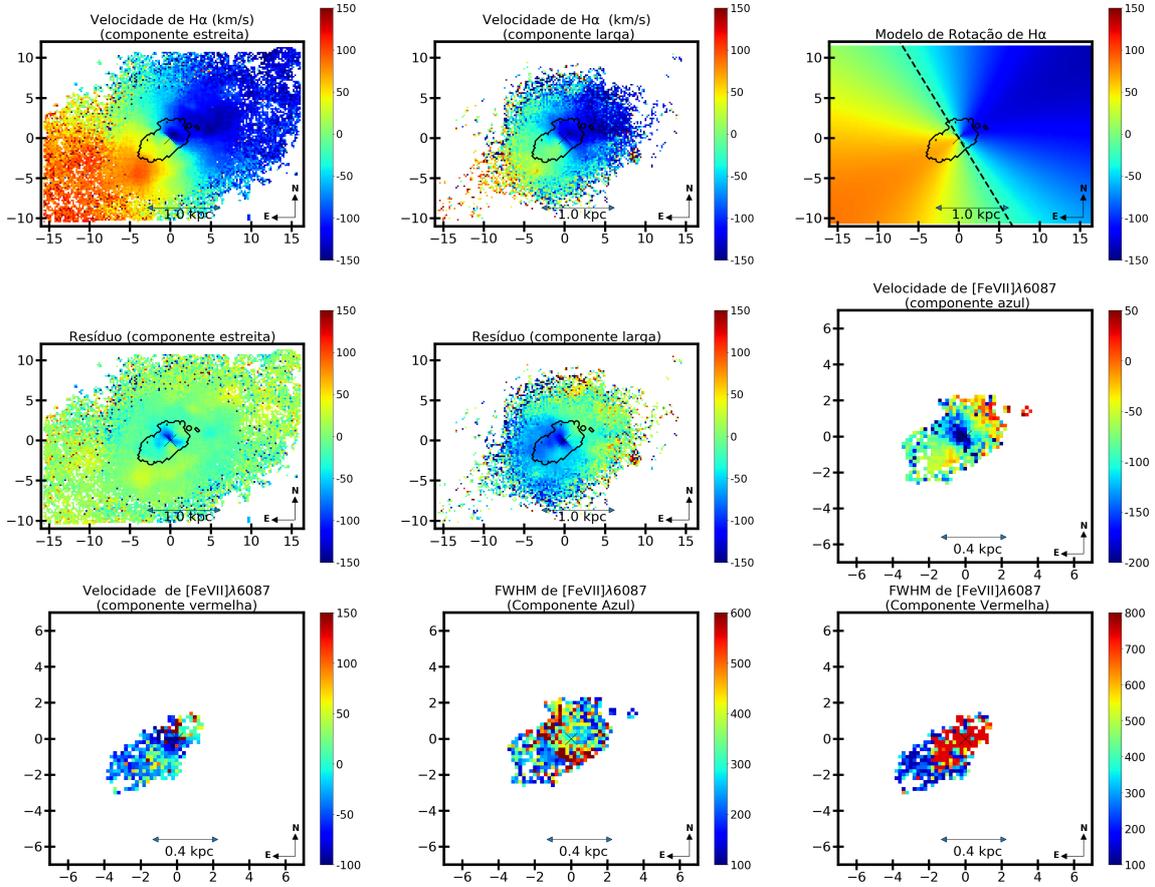
Mapas de canais da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  para a galáxia NGC 5728. Os fluxos são apresentados em unidades de  $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ .

$132 \text{ km s}^{-1}$ . Esse filamento é observado desde o núcleo até  $\sim 300 \text{ pc}$  a sudeste do AGN, sendo identificado espacialmente na região de emissão rádio da galáxia.

### 6.2.6 NGC 1068

Na galáxia NGC 1068, verificamos que as velocidades de  $\text{H}\alpha$ , tanto a componente estreita quanto a larga, apresentam altos valores de resíduos de velocidade na região co-espacial com o gás de  $[\text{Fe VII}]$  (ver Figura 6.12). Isso evidencia que o gás de  $\text{H I}$ , na região central, se afasta da rotação de disco. A componente estreita de  $\text{H}\alpha$

Figura 6.10 - Mapas da cinemática do gás de ESO 428.



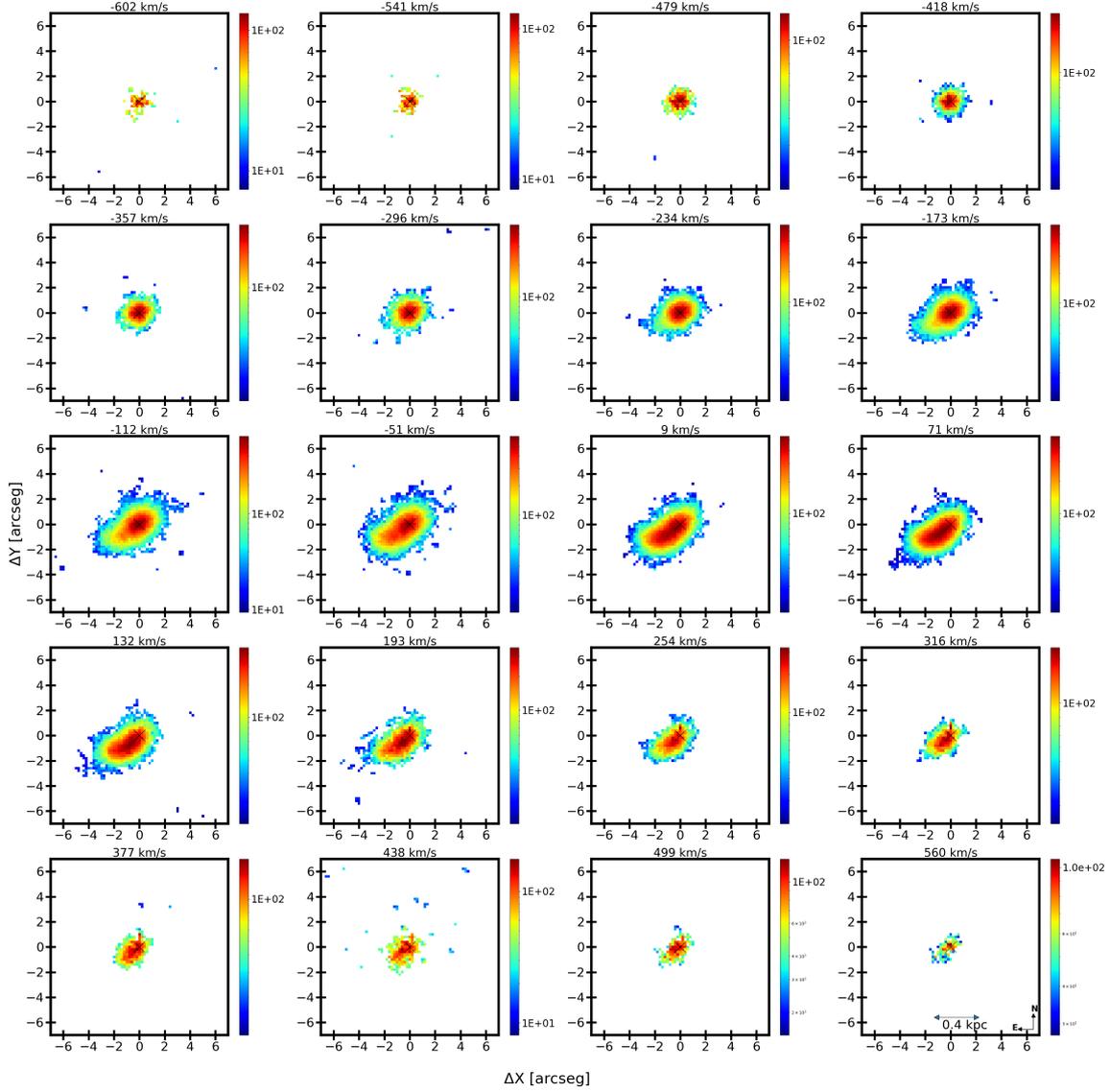
Igual à Figura 6.2 para a ESO 428.

acompanha os braços espirais, com velocidade de  $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$  (ver mapa de resíduos). Na componente larga, identificamos uma estrutura com velocidade negativa (a SO do AGN) que se estende além da região onde foi detectado [Fe VII]. Existe uma região com velocidade positiva a NE do AGN, além de algumas ramificações ligando a região nuclear a uma estrutura a 2 kpc do AGN no sentido leste.

Os mapas de velocidade de [Fe VII] mostram que o gás coronal não segue a rotação do disco da galáxia. De fato, os perfis de linha evidenciam a presença de duplo pico na região nuclear e na maior parte dos spaxels onde é observada. O intervalo de velocidades do gás de [Fe VII] encontra-se entre  $-1000 \text{ km s}^{-1}$  e  $800 \text{ km s}^{-1}$ , isto é, fortemente deslocado da velocidade de rotação do disco ( $-200 \text{ km s}^{-1} < V < 200 \text{ km s}^{-1}$ ). Concluimos, portanto, que o gás mais altamente ionizado encontra-se participando somente no *outflow*.

Destacamos que a emissão de [Fe VII] apresenta os maiores valores de FWHM de

Figura 6.11 - Mapas de canais para emissão coronal da galáxia ESO 428-14.



Mapas de canais da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  para a galáxia ESO 428-14. Os fluxos são apresentados em unidades de  $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ .

toda nossa amostra de galáxias. Para a componente azul, identificamos uma estrutura na direção NE – SO com valores de FWHM  $> 700 \text{ km s}^{-1}$  localizada desde a região nuclear até 500 pc do AGN. Para a componente vermelha, identificamos uma estrutura mais próxima ao centro, preferencialmente na direção SE – NO, com valores de FWHM maiores que  $700 \text{ km s}^{-1}$ . Os valores de FWHM diminuem gradativamente ao se afastar da região nuclear, chegando a  $120 \text{ km s}^{-1}$  nas regiões mais distantes do AGN.

Os mapas de canais, apresentados na Figura 6.13, ilustram movimentos de gás coronal no intervalo de  $-1176 \text{ km s}^{-1}$  até  $1154 \text{ km s}^{-1}$ . Para essa galáxia foram integrados 2 pixels do espectro em cada canal estudado, correspondendo a  $\Delta\lambda = 2,5 \text{ \AA}$ . Essa escolha foi necessária para cobrir um intervalo maior de velocidades, uma vez que NGC 1068 possui linhas de emissão com larguras de até  $1000 \text{ km s}^{-1}$ . O núcleo é claramente visível em todos os canais, evidenciando um gás fortemente turbulento. Além disso, entre os canais  $-685 \text{ km s}^{-1}$  e  $1154 \text{ km s}^{-1}$  pode-se ver emissão em uma região levemente estendida (até  $400 \text{ pc}$  do AGN) na direção NE – SO. Identificamos uma estrutura mais alongada ao norte do núcleo, detectada no canal  $50 \text{ km s}^{-1}$  e que se estende até  $1,3 \text{ kpc}$  do AGN. Essa emissão encontra-se alinhada com o jato rádio.

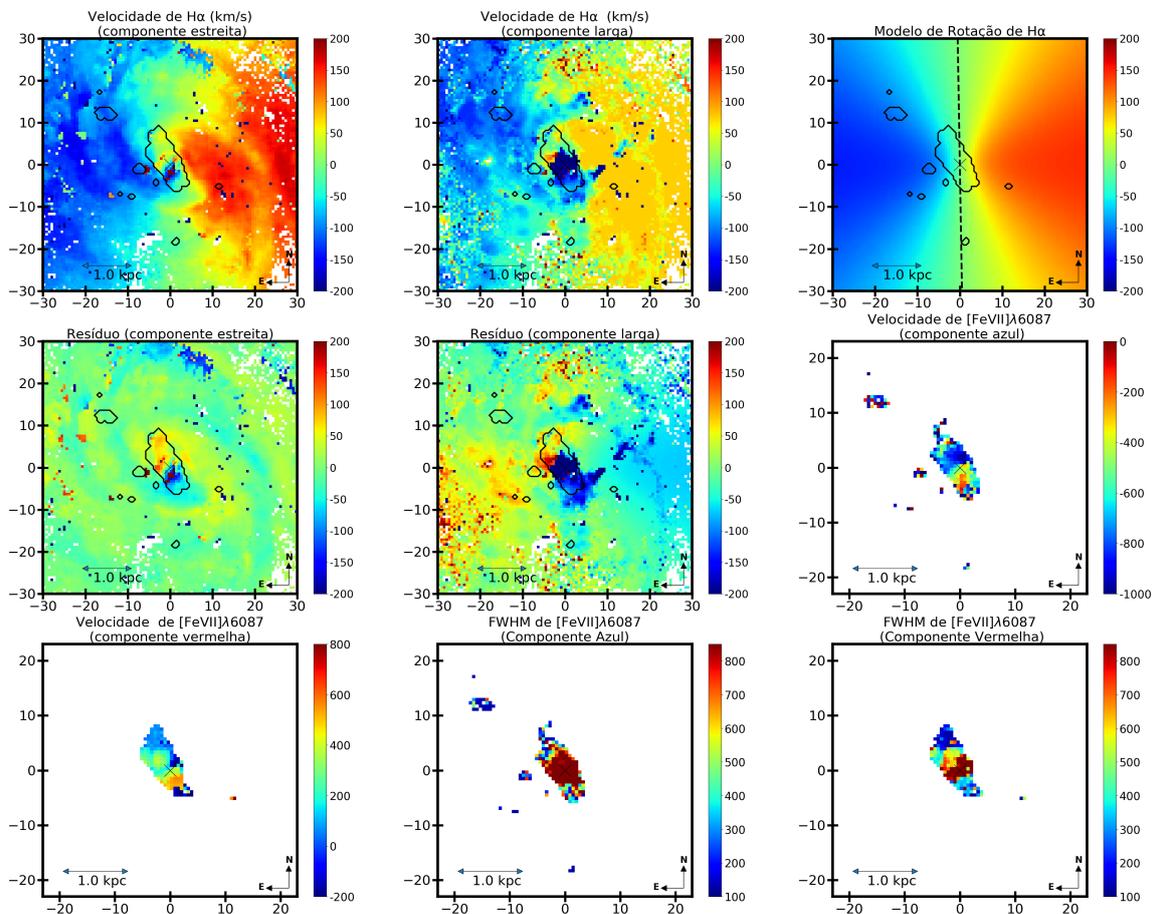
Encontramos duas regiões de emissão coronal ainda mais estendidas. A primeira está localizada a nordeste, entre  $1,5 \text{ kpc}$  e  $2,5 \text{ kpc}$  do AGN, podendo ser observada no canal  $-72 \text{ km s}^{-1}$ . A segunda, é fortemente compacta, situada a sudoeste, à distância de  $\sim 2,0 \text{ kpc}$  do AGN. Em ambas as regiões, a largura da linha está no limite da resolução instrumental ( $\sim 120 \text{ km s}^{-1}$ ). Não detectamos a contrapartida rádio co-espacial com a posição dessas emissões, mas existe emissão estendida de raio-X em ambas as posições. É possível que o gás esteja sendo excitado por um jato rádio pouco radiativo, mas que deposita a maior parte da sua energia ao meio na forma mecânica. Essa hipótese é suportada pelo aparente alinhamento observado nessas duas regiões estendidas com o eixo do jato rádio. Outra possibilidade é que a emissão observada seja alimentada por um *outflow* estelar, uma vez que ambas as regiões são observadas próximas do anel de formação estelar e de gás molecular existente nessa galáxia (GARCÍA-BURILLO et al., 2014; RICO-VILLAS et al., 2021).

### 6.2.7 Conclusões gerais para a cinemática do gás ionizado

Verificamos que a componente estreita de  $\text{H}\alpha$  reproduz adequadamente o movimento de um gás em rotação em um plano. Utilizamos essa linha para ajustar o modelo de rotação do gás, embora em algumas posições a componente estreita de  $\text{H}\alpha$  se desvia do movimento circular, provavelmente devido à interação com o jato. Essa possibilidade é real, visto que em alguns objetos (IC 5063, NGC 5643, NGC 5728 e NGC 1068) o eixo jato tem uma inclinação  $< 45^\circ$  em relação ao disco ao plano do disco. Recentemente, Venturi et al. (2021) confirmaram esse cenário mostraram que jatos pouco inclinados em relação ao disco perturbam fortemente o gás do disco da galáxia.

Quando comparamos os resultados da componente estreita de  $\text{H}\alpha$  verificamos que nas galáxias NGC 5643 e ESO 428 os modelos de rotação reproduzem adequada-

Figura 6.12 - Mapas da cinemática do gás de NGC 1068.

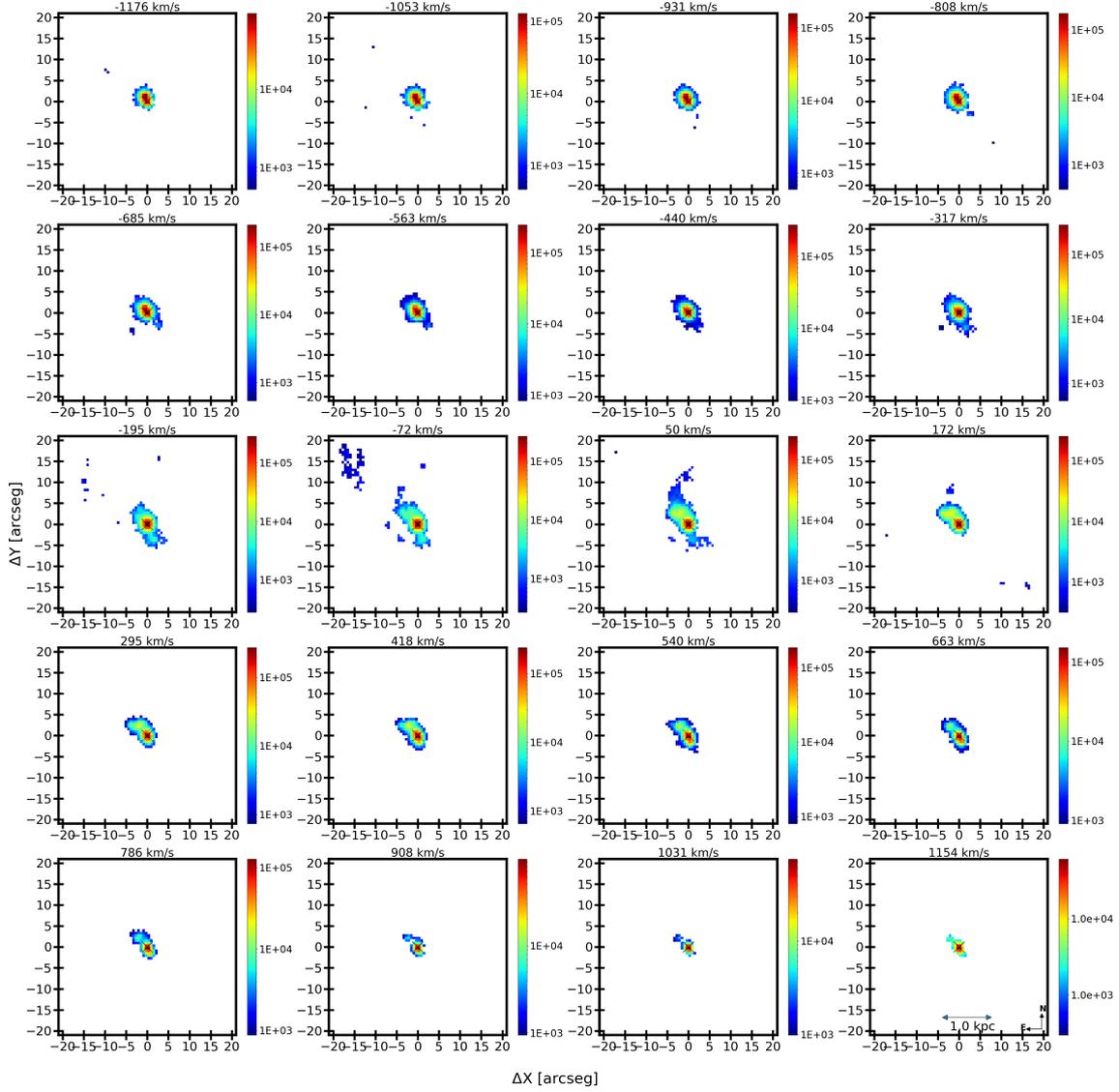


Igual à Figura 6.2 para a NGC 1068.

mente a cinemática observada para o gás. O resíduo apresenta flutuações menores que  $50 \text{ km s}^{-1}$ . Nas galáxias Circinus, IC 5063, NGC 5643, NGC 5728 e NGC 1068 encontramos regiões com variações significativas nos mapas de resíduos. Estruturas com velocidades residuais de  $\pm 100 \text{ km s}^{-1}$  são observadas principalmente próximas à região de gás coronal.

Os mapas de velocidades para a componente larga de H $\alpha$  indicam movimentos não circulares, apresentam movimentos desacoplados da rotação do disco da galáxia. São observadas amplitudes de velocidade residual maiores que  $150 \text{ km s}^{-1}$ . Esses resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que a componente mais larga deve estar ligada a um gás mais turbulento, relacionado com os *outflows* da galáxia. Essa hipótese tem suporte no fato de que principalmente em regiões co-espaciais à emissão de [Fe VII] encontramos gás com uma cinemática diferente daquela do disco, o que nos permite assumir que, mesmo para linhas de baixa ionização, essas regiões,

Figura 6.13 - Mapas de Canais para emissão coronal da galáxia NGC 1068.



Mapas de canais da linha de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$  para a galáxia NGC 1068. Os fluxos são apresentados em unidades de  $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ .

em menor grau, também participam do *outflow*.

Em geral, os mapas de velocidades e de canais mostram campos de velocidade associados ao gás coronal altamente complexos e turbulentos, além de estarem desacoplados da rotação do disco da galáxia. A componente vermelha é espacialmente maior nas galáxias Circinus, NGC 3393 e NGC 5728. Por outro lado, nas galáxias IC 5068 e ESO 428 foram detectados mais spaxels da componente azul. Nas galáxias NGC 5643 e NGC 1068 o número de spaxels das componentes azul e vermelha é muito semelhante. Não encontramos uma preferência clara entre a detecção das

componentes azul ou vermelha, indicando que não existe uma orientação preferencial entre o cone de ionização e o observador.

Os estudos da emissão coronal nessa seção basearam-se principalmente nos mapas de velocidades, mapas de canais e FWHM. Em todos os objetos da amostra percebe-se que as linhas de [Fe VII] possuem maiores valores de FWHM principalmente na região nuclear. Porém, sabemos que essas larguras não estão relacionadas com a BLR, mas sim com uma região de maior turbulência. Verificamos que a região emissora de gás coronal está concentrada principalmente na parte mais central do cone de ionização nas galáxias estudadas. Em todas as galáxias, identificamos emissão coronal estendida com velocidades do gás da ordem ou maiores que  $150 \text{ km s}^{-1}$ , e com fortes evidências de velocidades desacopladas do modelo de rotação. Esses resultados estão associados à presença de um jato, alinhado ao cone, que perturbou o meio interestelar. Resultados já apresentados da emissão rádio desses objetos suportam essa hipótese. A seguir, iremos caracterizar as propriedades físicas do gás em termos da sua densidade, temperatura e a energia associada aos *outflows* propostos aqui. Por fim, iremos estimar para cada galáxia a taxa e massa desses *outflows*.

### 6.3 Densidade do gás

A quantificação dos processos de *feeding* e *feedback* em AGNs é dependente dos valores de densidades adotadas no meio. Tradicionalmente, para obtenção da densidade eletrônica ( $n_e$ ) utilizam-se as razões de linhas do duplete [S II]  $\lambda\lambda 6716, 6731 \text{ \AA}$  (OSTERBROCK, 1989; PROXAUF et al., 2014). Embora as linhas de [S II] possuam limitações para o cálculo da densidade na região nuclear, onde gás com densidades acima de  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  é facilmente encontrado (e portanto o [S II] não é um diagnóstico confiável), ainda podem ser utilizadas como diagnóstico na região estendida da NLR. Tipicamente, a distâncias acima de 100 pc do AGN, o gás emissor possui densidades abaixo de  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  (ver Capítulo 1).

Assim, determinamos a densidade utilizando a Equação 4.2 e os fluxos das linhas de [S II]  $\lambda 6716$  e [S II]  $\lambda 6732$ . No processo, utilizamos o fluxo total (componente azul somada à componente vermelha). Os mapas de densidades são apresentados na Figura 6.14. Os contornos em magenta correspondem à emissão de [Fe VII].

Verificamos que, com exceção de ESO 428 e NGC 1068, na maior parte dos spaxels as densidades calculadas são da ordem de  $100 \text{ cm}^{-3}$ . Basicamente, em todas as imagens, as regiões de mais alta densidade ( $n_e > 300 \text{ cm}^{-3}$ ) estão associadas ao gás coronal, principalmente nas regiões onde a emissão de [Fe VII] é mais intensa. Ainda, observa-

se uma associação entre densidades mais altas e o aumento da turbulência do gás.

Em Circinus, a estrutura de emissão coronal ao noroeste do AGN possui densidades  $n_e \sim 270 \text{ cm}^{-3}$ , principalmente no centro e ao sul da região coronal estendida. Em ESO 428 são identificados valores de densidades maiores que  $600 \text{ cm}^{-3}$  em praticamente todos os spaxels co-espaciais com o gás coronal. Em IC 5063 os maiores valores de densidade ( $\sim 300 \text{ cm}^{-3}$ ) são co-espaciais com a emissão sudeste da emissão coronal. Na direção NO, as densidades se mantiveram baixas, da ordem de  $150 \text{ cm}^{-3}$ . Esse efeito é provavelmente devido ao fato de estarmos observando uma parte do disco da galáxia hospede, onde o gás possui densidades relativamente baixas.

Nas galáxias NGC 3393, NGC 5728 e NGC 1068, as regiões com maiores densidades ( $> 600 \text{ cm}^{-3}$ ) estão associadas à vizinhança do AGN ( $< 500 \text{ pc}$ ). Em NGC 5728, valores de densidades maiores que  $500 \text{ cm}^{-3}$  são identificados também em uma pequena ramificação a  $500 \text{ pc}$  ao sudoeste do AGN. Em NGC 5643, a região de mais alta densidade ( $> 300 \text{ cm}^{-3}$ ) é encontrada a leste do AGN, dentro dos contornos da emissão de [Fe VII]. Uma pequena estrutura a oeste, a  $500 \text{ pc}$  da fonte central, é observada com valores de densidade maiores que  $300 \text{ cm}^{-3}$ , dentro de uma pequena região emissora de [Fe VII].

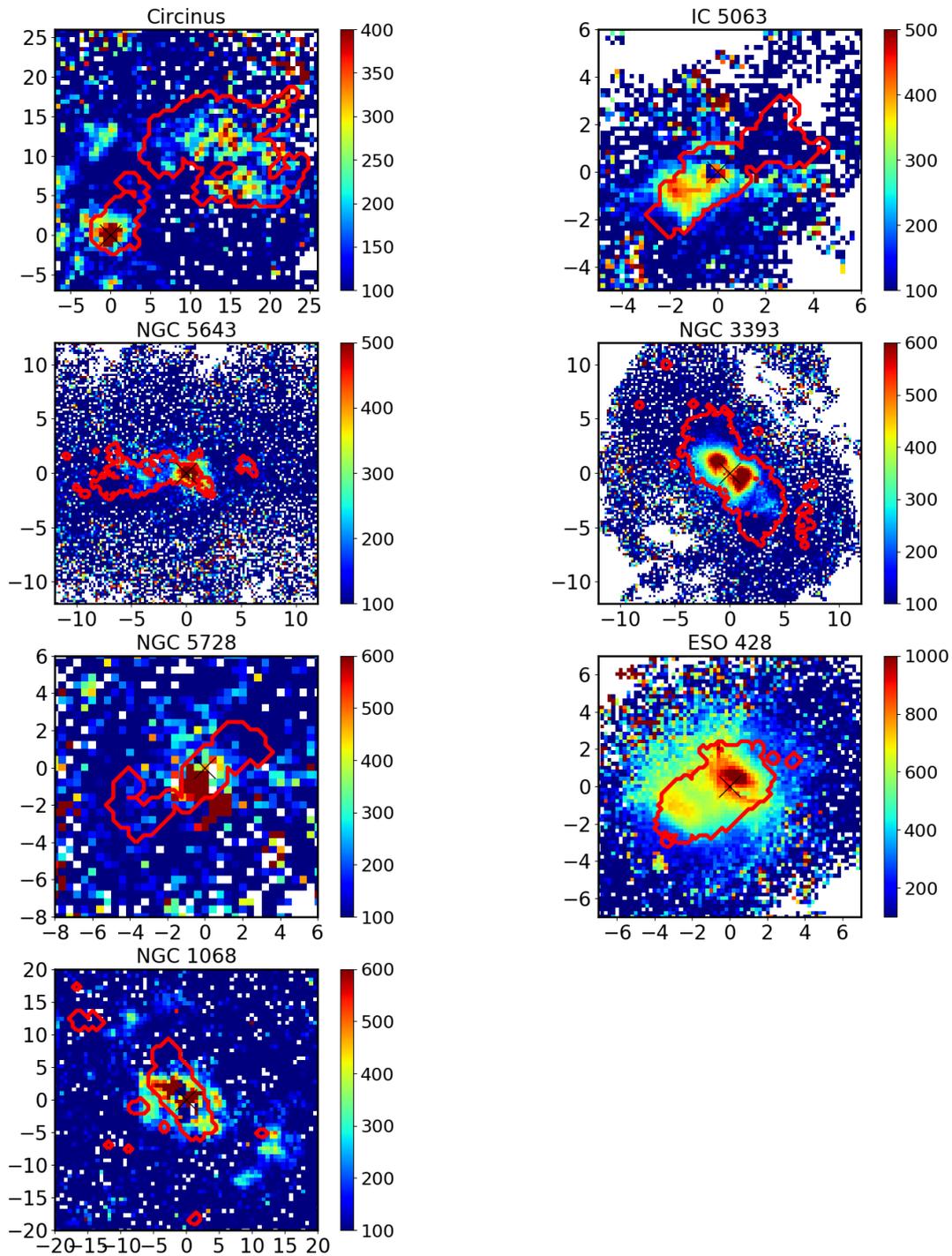
Os resultados acima indicam que os maiores valores de densidade ( $n_e > 300 \text{ cm}^{-3}$ ) foram encontrados principalmente nas regiões co-espaciais com a emissão coronal, particularmente nos sítios de mais alta turbulência. Sabemos que choques comprimem o gás, produzindo um aumento da densidade do meio. Nas seções acima e no capítulo anterior foi relatada uma forte associação entre o jato rádio emissor e o gás coronal. Portanto, os nossos resultados são compatíveis com a hipótese de um aumento da densidade do gás nas regiões que sofreram interação pela passagem do jato.

#### 6.4 Temperatura do gás

O intervalo de comprimento de onda dos dados MUSE nos permite determinar a temperatura eletrônica utilizando as linhas de [S III]  $\lambda 6312$  e [S III]  $\lambda 9069$ . Os resultados apresentados para as temperaturas do gás são sempre limitados pela linha de [S III]  $\lambda 6312$ , que está sobre forte influência de avermelhamento e possui um fluxo muito menor ( $\sim 10\%$ ) quando comparada com o fluxo da linha de [S III]  $\lambda 9069$ .

A metodologia utilizada para obtenção da temperatura em cada spaxel foi apresentada na Seção 4.4. Para determinação da temperatura utilizamos uma densidade

Figura 6.14 - Mapas de densidade eletrônica para as galáxias.



Os mapas estão em unidade de  $\text{cm}^{-3}$ . Apresentamos os contornos em vermelho da emissão de  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087$ .

de  $400 \text{ cm}^{-3}$ . Esse valor foi obtido através da média das densidades encontrada na seção anterior (ver Figura 6.14). Assim como comentado no Capítulo 4.4, a variação

de densidade em um intervalo de  $200 \text{ cm}^{-3}$  a  $800 \text{ cm}^{-3}$  não altera significativamente os valores encontrados para temperatura do gás. Dessa forma, foram produzidos mapas de temperatura para todas as galáxias da amostra exceto NGC 1068 (ver Figura 6.15). Nesse objeto, a linha de [S III]  $\lambda 6312$  está fortemente misturada com a componente vermelha da linha de [O I]  $\lambda 6300$  em praticamente todos spaxels em que o [S III] é observado, impossibilitando uma medida confiável dessa linha.

Como já foi mencionado, a determinação de  $T_e$  foi limitada pela região onde identificamos [S III]  $\lambda 6312$ . Em Circinus essa linha é detectada co-espacialmente com [Fe VII] (Ver contorno em preto na Figura 4.7). Encontramos uma temperatura média de  $10000 \pm 2500 \text{ K}$  na região próxima do AGN ( $< 150 \text{ pc}$ ) e uma temperatura média de  $13000 \pm 2000 \text{ K}$  na região estendida ( $> 200 \text{ pc}$  do AGN). Em IC 5063 determinamos a temperatura principalmente na região nuclear e nas regiões próximas aos rádio-nós identificadas nos sentidos SE e NO do AGN. Na região sudeste foram encontrados valores de temperatura da ordem de  $11000 \text{ K}$  na região coronal e  $14000 \text{ K}$  fora desta. Na estrutura sudoeste foram detectadas temperaturas médias de  $14000 \pm 3000 \text{ K}$  dentro e fora dos contornos da emissão coronal, com alguns pontos indicando  $T_e \sim 20000 \text{ K}$ .

Em NGC 5643, a temperatura do gás pode ser determinada principalmente na estrutura estendida ao leste do AGN, desde o núcleo até  $800 \text{ pc}$  da fonte central. Na direção oeste, derivamos  $T_e$  na parcela de gás localizada entre  $300$  e  $700 \text{ pc}$  do núcleo. Na primeira direção, as linhas de [S III] necessárias para determinar  $T_e$  estão presentes na região co-espacial com a emissão de [Fe VII]. Valores médios de  $10000 \text{ K}$  desde o núcleo até distâncias de  $600 \text{ pc}$  do AGN são encontrados. Dessa posição até a borda da emissão coronal estendida ( $600$  a  $800 \text{ pc}$  do AGN), observa-se um incremento no valor médio da temperatura, próximo de  $13000 \text{ K}$ . Na direção oposta, foi determinada uma temperatura média de  $14000 \pm 3500 \text{ K}$  na região entre  $400$  a  $800 \text{ pc}$  do AGN. O gás emissor de [S III] se estende a distâncias duas vezes maiores que a emissão coronal.

Em NGC 3393, foi determinada uma temperatura média de  $20000 \pm 5000 \text{ K}$ , ao longo da região emissora de [Fe VII]. Na direção nordeste, valores de temperatura de  $\sim 22000 \text{ K}$  são observados na parte central, principalmente contornando o rádio-nó presente nessa região. Porém, alguns pontos nas bordas externas da região emissora de [Fe VII] apresentam temperaturas consideravelmente menores, ao redor de  $10000 \text{ K}$ . No sentido sudoeste identificamos uma região com temperatura acima de  $28000 \text{ K}$ . Essa estrutura se localiza à distância de  $400 \text{ pc}$  do AGN, coincidente com a posição do rádio-nó presente nessa região. É importante ressaltar que os maiores

valores de  $T_e$  neste objeto estão associados aos rádio-nós assim como aos maiores valores de FWHM medidos na região coronal estendida.

NGC 5728 e ESO 428 apresentam comportamentos similares, com temperatura bastante homogênea na região onde [Fe VII] é detectado ( $13000 \pm 3000$  K e  $18000 \pm 4500$  K, respectivamente). Em ambos os objetos, observa-se um aumento considerável das temperaturas na borda SE, a partir da região onde a máxima extensão de [Fe VII] é identificada. Nessa extremidade, a  $T_e$  atinge valores de até 30000 K. No caso da ESO 428, essa região de alta temperatura ao SE coincide com uma bolha detectada em raios-X, que apresenta emissão intensa de [O III] (FABBIANO et al., 2017).

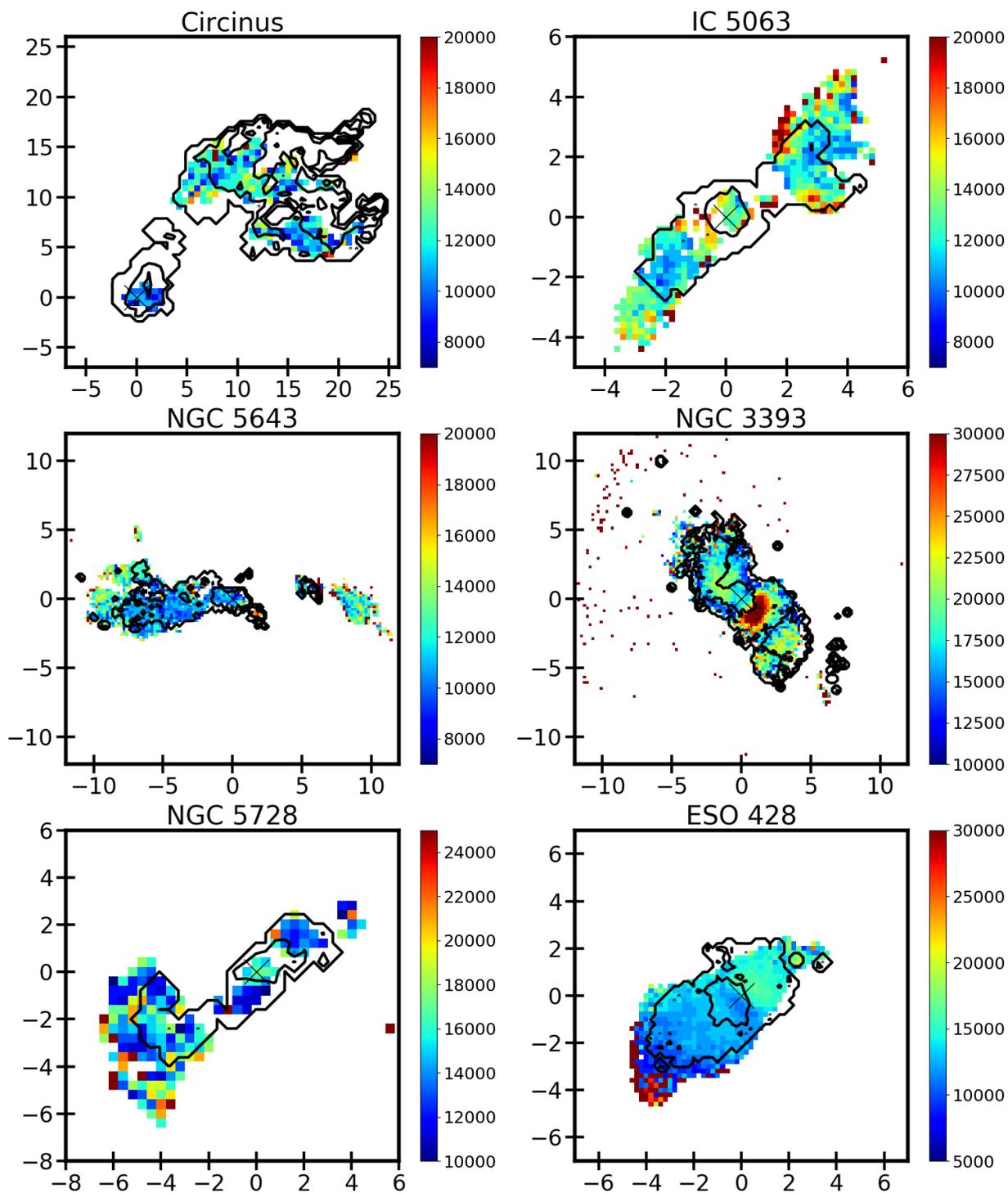
Os resultados acima indicam uma relação estreita entre o aumento da temperatura do gás, a região de emissão rádio e a emissão de [Fe VII]. Percebe-se, ainda, que os maiores valores de temperatura são também co-espaciais com os altos valores de FWHM e com o aumento da densidade do gás. Isso sugere que a emissão coronal estendida está vinculada a efeitos de choque produzidos pela interação do jato rádio-emissor e o gás do cone de ionização. Adicionalmente, o fato de que o gás coronal, em nenhum caso segue a rotação da galáxia, apresentando movimentos em excesso de várias centenas de  $\text{km s}^{-1}$ , evidencia que esse gás está sendo arrastado e vinculado diretamente com os *outflows* já detectados em outros comprimentos de onda ou através de outras linhas.

## 6.5 Cálculo das taxas e massas dos *outflows*

Os resultados discutidos nas seções anteriores evidenciam a presença de movimentos de gás ionizado fora da rotação disco da galáxia. Em todos os objetos, velocidades em excesso da ordem de centenas de  $\text{km s}^{-1}$  são observados, em geral, confinados aos cones de ionização.

Nessa seção iremos determinar a massa e a taxa (massas solares/ano) de gás ionizado, associado ao gás coronal, envolvido nesses movimentos de *outflows* nas galáxias da amostra. Para isso aplicaremos dois métodos. O método I utiliza o fluxo da linha de [O III] medido em uma estrutura bicônica (CANO-DÍAZ et al., 2012). O método II utiliza o fluxo da linha de  $\text{H}\beta$  em uma estrutura de casca esférica (SANTORO et al., 2018). Esses métodos propostos foram apresentados com mais detalhes no Capítulo 4. Para obtenção das taxas e massas dos *outflows* foram realizados os seguintes passos: i) construir uma máscara da emissão do gás coronal das componentes azul e vermelha. ii) Determinar o fluxo dessas componentes para as linhas

Figura 6.15 - Mapas da temperatura para as galáxias da amostra.



Mapas de temperatura para as galáxias da amostra em unidade de Kelvin. Em contorno é apresentado a razão de linhas  $[\text{Fe VII}] \lambda 6087 / \text{H}\beta$  (já apresentadas na Figura 6.1).

de  $H\beta$  e  $[O III] \lambda 5007$  nas máscaras, porém, fora da região nuclear (adotamos como região nuclear um círculo com raio de 150 pc centrado no AGN). Com essa restrição, estamos focando na emissão coronal estendida. iii) Calcular as taxas e massas dos *outflows* utilizando as Equações 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7. Aqui assumimos que o gás emissor de  $[O III]$  e  $H\beta$  origina-se do mesmo processo que produz a emissão coronal. Isto é, não existe contribuição de regiões de formação estelar ao fluxos dessas duas linhas.

Adicionalmente, calculamos a potência cinética do *outflow* (HOLT et al., 2006), de acordo com a Equação 6.1.  $\dot{M}_{out}$  é a taxa do *outflow* já calculada previamente,  $V_{out}$  é a velocidade do *outflow* e  $\sigma$  é dado por  $FWHM / 2,35$  da linha, sendo esse último fator adicionado devido à turbulência da linha.

$$\dot{E}_{out} = \frac{\dot{M}_{out}(V_{out}^2 + \sigma^2)}{2} \quad (6.1)$$

As máscaras utilizadas para as linhas de emissão de  $[Fe VII]$  são as mesmas apresentadas para emissão de  $[Fe VII]$  nas Figuras 4.24, 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 6.10 e 6.12. Nas figuras são mostradas separadamente as componentes azul e vermelha das linhas.

Os resultados das massas e taxas dos *outflows* obtidos para cada galáxia são apresentados na Tabela 6.1. Note que foram separados os valores para as componentes azul e vermelha. Também, listamos nessa tabela os resultados da potência cinética dos *outflows*, separados em métodos I e II. Com o intuito de facilitar reproduzir o cálculo por parte do leitor, incluímos fluxos e luminosidades das linhas de  $H\beta$  e  $[O III] \lambda 5007$  na região dos *outflows*, mas fora da região nuclear.

Tabela 6.1 - Seleção de galáxias estudadas com as informações de distância, luminosidade e extensão da emissão coronal.

	Circinus	IC 5063	NGC 5643	NGC 3393	NGC 5728	ESO 428	NGC 1068
Método I							
$F_{[\text{OIII}]}(\text{azul})$ <sup>1</sup>	$2,6 \times 10^{-12}$	$7,4 \times 10^{-13}$	$2,4 \times 10^{-13}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$8,7 \times 10^{-13}$	$6,8 \times 10^{-12}$
$F_{[\text{OIII}]}(\text{vermelha})$	$2,4 \times 10^{-12}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$2,2 \times 10^{-13}$	$7,4 \times 10^{-13}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$7,7 \times 10^{-12}$
$L_{[\text{OIII}]}(\text{azul})$ <sup>2</sup>	$5,6 \times 10^{39}$	$2,1 \times 10^{41}$	$7,4 \times 10^{39}$	$5,8 \times 10^{41}$	$1,2 \times 10^{41}$	$5,1 \times 10^{40}$	$2,4 \times 10^{41}$
$L_{[\text{OIII}]}(\text{vermelha})$	$5,1 \times 10^{39}$	$1,7 \times 10^{41}$	$6,8 \times 10^{39}$	$2,4 \times 10^{41}$	$1,2 \times 10^{41}$	$8,0 \times 10^{40}$	$2,7 \times 10^{41}$
$M_{\text{out}}(\text{azul})$ <sup>3</sup>	$9,9 \times 10^3$	$3,2 \times 10^5$	$1,6 \times 10^4$	$7,6 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$	$3,8 \times 10^4$	$3,1 \times 10^5$
$M_{\text{out}}(\text{vermelha})$	$9,0 \times 10^3$	$2,6 \times 10^5$	$1,4 \times 10^4$	$3,2 \times 10^5$	$2,0 \times 10^5$	$6,1 \times 10^4$	$3,6 \times 10^5$
$\dot{M}_{\text{out}}(\text{azul})$ <sup>4</sup>	0,12	0,77	0,032	0,78	0,85	0,15	2,9
$\dot{M}_{\text{out}}(\text{vermelha})$	0,10	0,62	0,029	0,33	0,80	0,24	3,3
$\dot{E}_{\text{out}}(\text{azul})$ <sup>5</sup>	$2,1 \times 10^{40}$	$2,6 \times 10^{40}$	$5,6 \times 10^{38}$	$1,9 \times 10^{40}$	$2,3 \times 10^{40}$	$5,6 \times 10^{39}$	$6,6 \times 10^{41}$
$\dot{E}_{\text{out}}(\text{vermelha})$	$1,9 \times 10^{40}$	$2,1 \times 10^{40}$	$5,2 \times 10^{38}$	$8,1 \times 10^{39}$	$2,1 \times 10^{40}$	$8,8 \times 10^{39}$	$7,5 \times 10^{41}$
Método II							
$F_{\text{H}\beta}(\text{azul})$ <sup>6</sup>	$2,8 \times 10^{-13}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$2,0 \times 10^{-14}$	$1,3 \times 10^{-13}$	$5,9 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$5,6 \times 10^{-13}$
$F_{\text{H}\beta}(\text{vermelha})$	$2,4 \times 10^{-13}$	$5,8 \times 10^{-14}$	$2,1 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$5,7 \times 10^{-14}$	$6,1 \times 10^{-14}$	$8,6 \times 10^{-13}$
$L_{\text{H}\beta}(\text{azul})$ <sup>7</sup>	$6,0 \times 10^{38}$	$3,6 \times 10^{40}$	$6,2 \times 10^{38}$	$4,3 \times 10^{40}$	$1,1 \times 10^{40}$	$7,2 \times 10^{39}$	$2,0 \times 10^{40}$
$L_{\text{H}\beta}(\text{vermelha})$	$5,2 \times 10^{38}$	$1,7 \times 10^{40}$	$6,3 \times 10^{38}$	$4,0 \times 10^{40}$	$1,1 \times 10^{40}$	$3,5 \times 10^{39}$	$3,0 \times 10^{40}$
$M_{\text{out}}(\text{azul})$ <sup>8</sup>	$1,4 \times 10^4$	$6,9 \times 10^5$	$1,7 \times 10^4$	$7,4 \times 10^5$	$2,6 \times 10^5$	$6,9 \times 10^4$	$3,3 \times 10^5$
$M_{\text{out}}(\text{vermelha})$	$1,2 \times 10^4$	$3,3 \times 10^5$	$1,7 \times 10^4$	$6,8 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$	$3,4 \times 10^4$	$5,1 \times 10^5$
$\dot{M}_{\text{out}}(\text{azul})$ <sup>9</sup>	0,051	0,53	0,011	0,24	0,33	0,087	0,98
$\dot{M}_{\text{out}}(\text{vermelha})$	0,044	0,25	0,011	0,22	0,31	0,043	1,5
$\dot{E}_{\text{out}}(\text{azul})$ <sup>10</sup>	$9,2 \times 10^{39}$	$1,8 \times 10^{40}$	$2,0 \times 10^{38}$	$6,0 \times 10^{39}$	$8,8 \times 10^{39}$	$3,2 \times 10^{39}$	$2,2 \times 10^{41}$
$\dot{E}_{\text{out}}(\text{vermelha})$	$7,9 \times 10^{39}$	$8,5 \times 10^{39}$	$2,0 \times 10^{38}$	$5,5 \times 10^{39}$	$8,4 \times 10^{39}$	$1,6 \times 10^{39}$	$3,4 \times 10^{41}$

<sup>1</sup> Fluxo da componente azul de [O III] na máscara de [Fe VII] ( $\text{erg s}^{-1}$ ). <sup>2</sup> Luminosidade da componente azul de [O III] ( $\text{erg s}^{-1}$ ). <sup>3</sup> Massa do *outflow* da componente azul de [O III] em unidades de  $M_{\odot}$ . <sup>4</sup> Taxa do *outflow* da componente azul obtida pelo fluxo de [O III] em unidades de ( $M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ ). <sup>5</sup> Potência cinética do *outflow* da componente azul obtida pelo fluxo de [O III] em unidades de ( $\text{erg s}^{-1}$ ). <sup>6</sup> Fluxo da componente azul de H $\beta$  na máscara de [Fe VII] ( $\text{erg s}^{-1}$ ). <sup>7</sup> Luminosidade da componente azul de H $\beta$  ( $\text{erg s}^{-1}$ ). <sup>8</sup> Massa do *outflow* da componente azul de H $\beta$  em unidades de  $M_{\odot}$ . <sup>9</sup> Taxa do *outflow* da componente azul obtida pelo fluxo de H $\beta$  em unidades de ( $M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ ). <sup>10</sup> Potência cinética do *outflow* da componente azul obtida pelo fluxo de H $\beta$  em unidades de ( $\text{erg s}^{-1}$ ).

Os resultados obtidos indicam taxas de *outflow* entre 0,042 e  $4,3 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  (valores

obtidos utilizando a média do método I e método II). Os valores obtidos pelos dois métodos estão na mesma ordem de grandeza, embora os resultados obtidos pelo método I sejam três vezes maiores que os obtidos pelo método II. Isto pode ser explicado pelo fato de que  $H\beta$  é um fator  $\leq 3$  em relação a  $[O III]$

Tabela 6.2 - Taxas e potência cinética dos *outflows* observados neste trabalho e encontradas na literatura.

Galáxia	$\dot{M}_{\text{out}}$ da literatura ( $M_{\odot} \text{ano}^{-1}$ )	$\dot{M}_{\text{out}}$ observada ( $M_{\odot} \text{ano}^{-1}$ )	$\dot{E}_{\text{out}}/L_{\text{AGN}}$
Circinus	0,01 <sup>1</sup>	0,16 $\pm$ 0,02	7,5 $\pm$ 1,1 $\times 10^{-4}$
IC 5063	12 <sup>2</sup>	1,1 $\pm$ 0,2	4,8 $\pm$ 0,7 $\times 10^{-5}$
NGC 5643	0,3 <sup>3</sup>	0,042 $\pm$ 0,01	7,4 $\pm$ 1,1 $\times 10^{-5}$
NGC 3393	0,6 <sup>4</sup>	0,79 $\pm$ 0,02	2,5 $\pm$ 0,4 $\times 10^{-5}$
NGC 5728	0,08 <sup>5</sup>	1,1 $\pm$ 0,2	2,0 $\pm$ 0,3 $\times 10^{-4}$
ESO 428-14	8,0 <sup>6</sup>	0,26 $\pm$ 0,05	6,4 $\pm$ 0,9 $\times 10^{-3}$
NGC 1068	0,24 <sup>4</sup>	4,3 $\pm$ 0,8	1,2 $\pm$ 0,2 $\times 10^{-3}$

Fonte: <sup>1</sup> Maiolino et al. (2000); <sup>2</sup>Oosterloo et al. (2017); <sup>3</sup>Riffel et al. (2018); <sup>4</sup>Finlez et al. (2018); <sup>5</sup>Shimizu et al. (2019); <sup>6</sup>May et al. (2018); <sup>6</sup>Shin et al. (2021).

Podemos relacionar a energia mecânica do *outflow* com a luminosidade bolométrica do AGN. Para isso introduzimos o conceito de eficiência cinética do *outflow*  $\dot{E}_{\text{out}}/L_{\text{AGN}}$ . Essa eficiência pode ser utilizada para testa se os *outflows* são capazes de influenciar significativamente na evolução da galáxia hospedeira. Os valores relatados na literatura para a eficiência cinética encontram-se no intervalo de  $10^{-5}$  a  $10^{-1}$ . O artigo de revisão apresentado por Harrison et al. (2018) propõem que altos valores dessa eficiência ( $> 1\%$ ) podem ser capazes de extinguir a formação estelar de galáxia massivas.

Encontramos valores de eficiência cinética dos *outflows* entre  $7,4 \times 10^{-5}$  e  $6,4 \times 10^{-3}$  (ver Tabela 6.2). Os resultados apresentados aqui estão cerca de uma ordem de grandeza do limite mínimo de eficiência ( $\sim 1\%$ ) no contexto de evolução galáctica. Sendo assim, ao utilizar apenas a região co-espacial com  $[\text{Fe VII}]$  encontramos um resultado

de eficiência do *outflow* que é um limite inferior de eficiência do *outflow*. Vale ressaltar que nos cálculos das taxas de *outflows* o valor de densidade está no numerador da equação. Porém, os valores de densidade eletrônica foram obtidos utilizando as razões de linhas do duplete [S II]  $\lambda 6716, 6731 \text{ \AA}$ . Esse método subestima os valores de densidade. Por exemplo no artigo de [Davies et al. \(2020\)](#) mostram que a utilização do duplete [S II]  $\lambda 6716, 6731 \text{ \AA}$  apresentam resultados de densidades cerca de cinco vezes menor que os resultados obtidos utilizando as linhas de [O II]  $\lambda 7320, 7321 \text{ \AA}$  e [S II]  $\lambda 4068, 4076 \text{ \AA}$ . Além de ser quatorze vezes menor quando comparados o método baseado no parâmetro de ionização (U). Levando em conta o problema com a densidade e o fato de a região do gás coronal ser mais compacta que a região em *outflow* traçada por outras linhas (por exemplo, [O III]), podemos apresentar aqui um limite inferior para a eficiência cinética encontrada. Da mesma forma, os valores para taxa e massa do *outflow* também devem ser vistos como limites inferiores.

Embora o *outflow* de gás ionizado não seja suficiente para deter o processo de formação estelar, os resultados obtidos por outros autores em IC 5063 ([MORGANTI et al., 2015](#)) apontam para a existência de *outflows* em outras fases (molecular e gás neutro) co-espacial com o de gás ionizado. De fato, este último é apenas uma fração da massa total expulsa pelo processo de *feedback*. Contudo, frisamos aqui a importância do gás altamente ionizado, como resultado da interação do jato rádio e o ISM em objetos rádio-silenciosos. É evidente que estes jatos não possuem potência suficiente para deter o processo de formação estelar, mas participam ativamente do *feedback* da galáxia. A presença de emissão coronal estendida é prova não-ambígua desse processo.



## 7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, usando espectroscopia IFU com MUSE/VLT, analisamos uma amostra de 7 galáxias Seyfert 2 que possuem luminosidade média/baixa e jatos de baixa potência visando estudar a componente ionizada dos *outflows* através de linhas coronais. A seguir, ressaltamos os resultados mais relevantes derivados para cada objeto e posteriormente apresentamos os resultados gerais e as perspectivas futuras.

### 7.1 Galáxia Circinus

Os resultados do Capítulo 4 mostraram a existência de um gás em *outflow* sendo traçado pela linha de emissão de [Fe VII] que está projetado na direção do jato rádio. Encontramos, pela primeira vez na literatura, emissão de [Fe VII] até uma distância de  $\sim 700$  pc do núcleo e emissão de [Fe X] a uma distância de  $\sim 350$  pc do núcleo. Percebe-se que a emissão coronal está em uma região do diagrama BTP dominada pelo AGN (Figura 5.8), traçada por [Fe VII], coincidente também com uma região de gás com maiores valores de densidades ( $n_e \sim 270 \text{ cm}^{-3}$ ) e temperaturas ( $T_e \sim 13000$  K). Encontramos que o gás de alta ionização, fora da região nuclear, é caracterizado por temperaturas de até 25000 K e densidades eletrônicas de até  $10^4 \text{ cm}^{-3}$ .

Os resultados da cinemática mostram que o gás de [Fe VII] se encontra fora do plano da galáxia, indicando movimentos desacoplados da rotação da galáxia. Identificamos a presença de duplo pico na maior parte das linhas coronais. Existem fortes evidências que a emissão coronal seja produzida por um jato que passou próximo ao eixo do cone de ionização, inflando o gás e produzindo bolhas em expansão. A estrutura proposta coincide bem com a emissão em raios-X detectados pelo Chandra.

Estudos do grau de ionização do gás, através da razão de fluxo [Fe VII] /  $H\beta$  nos permitiu identificar que os maiores valores dessa razão encontram-se nas regiões mais distantes do núcleo da galáxia, o que sugere a existência de mecanismos adicionais para produção de linhas coronais além da fotoionização pelo AGN. Os resultados encontrados no Capítulo 4 indicam que na região co-espacial com a emissão [Fe VII] existe o efeito acoplado de fotoionização pela fonte central e por choques. Os modelos gerados pelo SUMA confirmaram essa hipótese, onde os efeitos de choques devem dominar na região estendida, traçada por [Fe VII]. Os modelos apresentados indicam a presença de choques com velocidades maiores que  $150 \text{ Km s}^{-1}$  para reproduzir essa emissão. Os nossos resultados para cinemática do gás confirmam esse cenário.

Nosso trabalho apresenta fortes evidências da passagem de um jato em Circinus, liberando a maior parte de sua energia na forma mecânica. Os mapas rádio da galáxia reforçam essa hipótese, uma vez que em Circinus a emissão rádio se estende até 2 kpc na mesma direção do cone de ionização perpendicular ao plano do disco. Esses jatos mostram ser muito relevantes em objetos rádio-silenciosos, onde para o nosso caso, em Circinus, encontramos uma taxa *outflow* com valor de  $\sim 0,3 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  e uma potência cinética do jato dada por 0,1%.

## 7.2 IC 5063

Essa galáxia possui um *outflow* já estudado em escalas de parsecs e quiloparsecs, cuja presença foi também confirmada neste trabalho. Encontramos pela primeira vez na literatura emissão coronal de [Fe VII] desde a região central até uma distância de  $\sim 1,2$  kpc, alinhada com o jato rádio-emissor observado na galáxia. Ainda, detectamos gás emissor de [Fe X] estendido nas direções SE, SO e NO, até uma distância  $\sim 700$  pc do AGN no sentido Noroeste. O diagrama BPT nos permite concluir que praticamente toda emissão observada no campo do MUSE está associada ao cone de ionização, onde os spaxels estão em sua maioria dominados pelo AGN, chegando até escalas de  $\sim 10$  kpc.

Os modelos de rotação para o gás ionizado mostram que na região central o gás emissor está desacoplado da rotação do disco, com velocidades em excesso que ultrapassam  $400 \text{ Kms}^{-1}$ . A galáxia possui emissão rádio em três locais principais, coincidentes com lugares de maior intensidade da emissão coronal ( $> 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ ) e altos valores de largura das linhas (FWHM  $\sim 500$ ). Um desses locais encontra-se no núcleo e os outros dois estão localizados a noroeste e sudeste do AGN a uma distância de respectivamente 500 pc e 400 pc. A distribuição do gás coronal estendido está em acordo com a hipótese do jato comprimindo lateralmente o gás do ISM, produzindo choques e, como resultado, linhas de alta ionização.

A razão de linha [O III] /  $H\beta$  indica um aumento da intensidade de [O III] com o afastamento do AGN, principalmente na região noroeste e sudeste, acompanhando a direção da emissão coronal. A região coronal a sudeste possui maiores valores das razões de [O III] /  $H\beta$  e [Fe VII] /  $H\beta$ . Essa região apresenta maior densidade eletrônica ( $\sim 300 \text{ cm}^{-3}$ ) e é dominada por componentes das linhas de emissão com velocidades positivas. A razão [Fe VII] /  $H\beta$  se mantém constante ao se afastar do AGN, principalmente para regiões mais distantes que 150 pc. Esse resultado indica que a fonte central não é o único mecanismo de excitação do gás.

A temperatura eletrônica na região coronal atinge valores de  $\sim 14000$  K, principalmente nas bordas externas dessa região. Identificamos que a temperatura aumenta na borda externa da emissão coronal, o que pode indicar a presença de efeitos de choques. Ao analisar a massa e taxa dos *outflows* traçados pela região de gás coronal encontramos uma massa de  $5,8 \times 10^5 M_{\odot}$  (método I) e  $1,0 \times 10^6 M_{\odot}$  (método II) e uma taxa de *outflow* de  $1,4 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  (método I) e  $0,8 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  (método II). Encontramos uma eficiência cinética do *outflow* associada com a emissão coronal dada por 0,005%. Esse baixo valor de eficiência deve-se principalmente a região da emissão coronal estar muito compacta quando comparada com a região do gás de [O III] em *outflow* que possui uma região cerca de  $20\times$  maior.

### 7.3 NGC 5643

Essa galáxia é conhecida por possuir um cone de ionização e dois lóbulos rádio alongados na direção leste-oeste, sendo visível o seu cone e contra-cone. Alinhado com esse cone identificamos emissão coronal até uma distância de  $\sim 845$  pc a leste do AGN. Ao oeste, a 300 pc da fonte central, observamos uma região compacta de emissão coronal. Ambas as emissões possuem duas componentes no espectro, representando assim dois cones opostos. Identificamos também emissão do gás de [Fe X] à distância de 317 pc do AGN a leste do núcleo. O estudo da rotação do gás de  $H\alpha$  nos permite verificar pequenas regiões de gás se deslocando em  $100 \text{ km s}^{-1}$  em relação ao modelo de rotação. Essas regiões localizadas a 250 pc do AGN, são encontradas principalmente a nordeste e sudoeste e estão dentro dos contornos do gás coronal (ver Figura 4.13). Quanto ao gás de [Fe VII], são detectadas regiões com duplo pico na região nuclear. A emissão estendida de gás de [Fe VII] no sentido leste possui um movimento de expansão lateral com velocidades positivas ao norte e negativa ao sul.

A emissão rádio está alinhada com o cone de ionização e possui uma extensão duas vezes maior que a emissão coronal ( $\sim 1,5$  kpc). As razões de linhas [O III] /  $H\beta$  e [Fe VII] /  $H\beta$  indicam uma região de alta ionização nas regiões mais centrais, com valores de  $\sim 15$  e  $\sim 0,1$ , respectivamente. Nas regiões mais externas ao Leste, entre 150 pc e 750 pc, as razões se mantêm basicamente constantes, com valores de  $\sim 13$  e  $\sim 0,09$ , respectivamente. No entanto, para a linha de baixa ionização [N II] /  $H\beta$ , os valores das razões na região coronal claramente diminuem gradativamente com a distância à fonte central, variando de 5 para 2.

O mapa de temperatura indica valores de  $\sim 11000$  K na maior parte do cone, além de valores de até 14000 K nas bordas externas da emissão coronal. Detectamos uma

emissão mais estendida da linha de [S III]  $\lambda 6312$ , encontrada a oeste, a uma distância de 760 pc do AGN. Ao analisar os dados, verificamos que existe emissão coronal nesse local, porém, é necessário integrar um maior número de spaxels para que a mesma seja identificada. Os mapas de densidade eletrônica indicam valores de  $250 \text{ cm}^{-3}$  na região do *outflow* o que nos permitiu obter valores médios para massa e taxa de *outflow*, dada por  $3,2 \times 10^4 M_{\odot}$  e  $0,042 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . Obtemos também valores de eficiência cinética do *outflow* associada com a emissão coronal dada por 0,007%.

#### 7.4 NGC 3393

Esta galáxia possui emissão coronal estendida orientada na direção nordeste-sudoeste, coincidente com um duplo jato e uma emissão de gás ionizado em forma de ‘S’. Detectamos emissão de [Fe VII] ao longo da estrutura em formato em ‘S’, com valores de fluxo maiores que  $5 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ . A emissão coronal mais intensa coincidem com a emissão rádio detectada com o VLA. Identificamos também que a emissão em raio-X acompanha a emissão coronal, sendo que os maiores valores da emissão raio-X são co-espaciais com os maiores valores de fluxos de [Fe VII]. Observamos emissão de [Fe VII] até 2,6 kpc do AGN no sentido sudoeste e emissão de [Fe X] a 1,2 kpc do AGN. Essa é a detecção mais estendida de [Fe X] em toda a nossa amostra de galáxias.

O mapa de velocidade da componente larga de  $H\alpha$  (componente larga) indica que o gás associado segue movimentos não circulares. Os maiores excessos de velocidade em relação ao gás em rotação se dão em posições co-espaciais com a emissão coronal. A emissão da linha de [Fe VII] apresenta duplo pico na maior parte dos spaxels onde é observada. Reportamos uma associação entre a velocidade da linha de [Fe VII] e a linha de  $H\alpha$  (componente larga), o que nos permite supor que a componente larga desta última linha está associada ao *outflow* deste objeto.

As razões de linhas nos mostram um comportamento semelhante ao de Circinus, onde  $[O III] / H\beta$  e  $[Fe VII] / H\beta$  possuem valores que aumentam ao se distanciar do AGN. Em contraste, a razão  $[N II] / H\beta$  diminui nas extremidades da emissão coronal. Existe uma região a sudoeste, a 1,5 kpc, onde a razão de  $[Fe VII] / H\beta$  passa de 0,07 para 0,15, enquanto a razão de  $[N II] / H\beta$  passa de 3,5 para 1,5. Trata-se de uma região de alta ionização excitada por efeitos de choques. No mapa de densidade, encontramos uma região com densidades maiores que  $600 \text{ cm}^{-3}$  em duas parcelas de gás a nordeste e sudoeste, ambas a 500 pc do AGN, sendo elas co-espaciais com a emissão rádio. Em relação à temperatura eletrônica, apenas na região de alta densidade, a noroeste, encontra-se uma alta temperatura, com valores  $\sim 30000 \text{ K}$ . As

demais regiões possuem valores típicos de 22000 K. Os resultados obtidos aqui indicam uma associação entre emissão coronal, emissão rádio, emissão raio-X, altos valores de temperatura, alto grau de ionização e alta densidade. Portanto, é a evidência mais clara da presença de choques como o mecanismo dominante da excitação do gás. Por fim, estimamos uma densidade média de  $400 \pm 100 \text{ cm}^{-3}$  para região do gás coronal. Obtivemos uma massa e taxa de *outflow* médio dadas por  $1,2 \times 10^6 M_{\odot}$  e  $0,8 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . Obtemos também a eficiência cinética do *outflow* associada com a emissão coronal dada por 0,002%.

## 7.5 NGC 5728

Esse AGN apresenta emissão coronal estendida preferencialmente na direção sudeste, embora o local emissor de [Fe VII] mais distante do AGN se encontra a noroeste. Utilizando a integração de uma região circular com raio  $1,2''$  encontramos emissão de [Fe VII] a 2,0 kpc do AGN. Observamos também emissão de [Fe X] estendida à distância de 282 pc do AGN no sentido sudeste. Nessa direção encontramos emissão coronal em formato muito peculiar, com uma ramificação de 1 kpc em uma extremidade semelhante a uma casca em expansão. A emissão rádio nessa galáxia está alinhada com a emissão coronal, sendo localizada desde a região central até as extremidades sudeste e noroeste da região coronal. Na mesma direção foi observado também emissão raio-X.

O mapa de rotação para  $H\alpha$  mostra componentes do gás deslocada para o azul na extremidade da extensão coronal, em formato de arco, localizado a 1,5 kpc (ver mapa de resíduos na Figura 6.8). Na direção noroeste, também é possível encontrar uma estrutura semelhante. De fato, essa região de arcos possui emissão coronal, porém necessita a integração de mais de 10 spaxels para mapear essa linha. Esses dois arcos encontrados coincidem com os limites da detecção rádio realizada para essa galáxia (ver Figura 6.8).

Os mapas de razão de linhas  $[O III] / H\beta$  possuem valores de razões que permanecem em  $\sim 10$  por toda extensão coronal. O mapa de temperatura apresenta valores de médios de  $16000 \pm 4000 \text{ K}$ , sendo eles encontrados em toda a extensão coronal. As linhas de diagnósticos de temperatura são encontradas até 1,5 kpc, exatamente nos dois arcos já citados aqui, a sudeste e noroeste, porém existe a necessidade da integração de mais de 10 spaxels para observá-las. Por fim, calculamos média da massa e a taxa de *outflow*, e encontramos respectivamente:  $4,7 \times 10^5 M_{\odot}$  e  $\sim 1,1 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . A eficiência cinética do *outflow* associada com a emissão coronal dada por 0,02%.

## 7.6 ESO 428

A galáxia ESO 428 possui emissão coronal estendida na direção SE-NO, sendo observada até 638 pc na direção sudeste e 250 pc na direção noroeste. Detectamos a emissão de [Fe X] preferencialmente no sentido noroeste, sendo observada à distância de 180 pc do AGN. A galáxia possui uma emissão rádio mais compacta, localizada principalmente a sudeste. Possui uma estrutura que parece sofrer uma deflexão na região com os maiores valores de emissão de [Fe VII] ( $F_\lambda = 6 \times 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$ ).

A cinemática do gás emissor de [Fe VII] está desacoplada do movimento do disco. Perfis de duplo pico são identificados em mais de 50% dos spaxels onde é observada essa linha. A NLR possui linhas de emissão com valores de FWHM da ordem de  $700 \text{ km s}^{-1}$ . Esse gás emissor se mostra muito turbulento, com altos valores de densidade e temperatura.

A ESO 428 possui uma razão de linha [O III] / H $\beta$  com valores relativamente constantes, de aproximadamente 12, ao longo de praticamente toda extensão coronal, com um leve aumento nos limites nordeste desta emissão. As razões de [Fe VII] / H $\beta$  permanecem constantes, com valores de 0,04 nas regiões de gás coronal fora de um raio de  $\sim 150$  pc da região central. Encontramos que os maiores valores de densidades do gás se localizam ao longo da direção da emissão coronal, tipicamente de  $750 \text{ cm}^{-3}$ . Na região sudeste do gás coronal foram encontradas densidade de  $700 \text{ cm}^{-3}$  e na região nordeste as densidades foram maiores que  $1000 \text{ cm}^{-3}$ . Os mapas de temperatura apresentam na região sudeste valores de 13000 K e na região noroeste 18000 K. Utilizando a média do método I e do método II para encontrar a massa e a taxa de *outflow*, os valores obtidos foram respectivamente:  $1,0 \times 10^5 M_\odot$  e  $\sim 0,26 M_\odot \text{ ano}^{-1}$ . Essa galáxia possui o maior valor de eficiência cinética de toda amostra, obtemos  $\dot{E}_{\text{out}} / L_{\text{AGN}} = 0,6\%$ .

## 7.7 NGC 1068

A galáxia NGC 1068 é o objeto com maior extensão coronal. Identificamos emissão de [Fe VII] na direção SO-NE na região mais central, até 1,0 kpc do AGN. As regiões mais estendidas da emissão coronal são identificadas em locais situados a nordeste do AGN à distância de 2,8 kpc. Esse valor é  $7 \times$  maior que a maior extensão encontrada anteriormente na literatura. Observamos também a emissão de [Fe X] no sentido norte-nordeste, à distância de 700 pc do AGN. Essa galáxia possui características peculiares, onde a emissão coronal é bem clara até 1,0 kpc, porém entre 1,0 kpc e 1,8 kpc a emissão não é identificada, mesmo quando integrada em 10 ou mais spaxels.

O mapa de resíduo do modelo de rotação de  $H\alpha$  (componente estreita) aparenta mapear os braços espirais, com velocidade variando em  $50 \text{ Kms}^{-1}$  do modelo de rotação. Na região do gás coronal percebe-se uma região de *outflow* com velocidades que ultrapassam  $\pm 150 \text{ km s}^{-1}$ . Esse resultado pode ser visto mais claramente para componente larga de  $H\alpha$ .

A emissão rádio encontrada é mais compacta que a emissão do gás coronal, sendo identificada principalmente na direção nordeste a uma distância de 400 pc do AGN. No entanto, a emissão de raio-X está concentrada desde a região nuclear até  $\sim 5 \text{ kpc}$  no sentido sudoeste e nordeste do AGN, estando assim sobreposta sobre toda emissão coronal. Percebe-se que a emissão coronal é mais compacta que a emissão em raio-X, onde sua extensão é metade da extensão da emissão raio-X.

O mapa da razão de linha  $[\text{O III}] / H\beta$  apresenta valores altos ( $> 10$ ) em duas regiões, i) ao longo da a emissão central até 1,0 kpc e ii) na região nordeste, encontrada a distâncias maiores que 2,0 kpc. Os mapas de densidade apresentaram regiões de mais alta densidade ( $> 600 \text{ cm}^{-3}$ ) nos pontos de maiores velocidades do gás ionizado e do gás coronal, sendo que no gás coronal os valores ultrapassam  $750 \text{ km s}^{-1}$  tanto para componente azul quanto para componente vermelha. Os resultados para a taxa do *outflow* de NGC 1068 foram os maiores em nossa amostra de galáxias, com um valor médio de  $4,3 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . Obtemos também um valor médio para massa do *outflow*, dado por  $7,6 \times 10^5 M_{\odot}$  e eficiência cinética associada a emissão coronal dada por 0,1%.

## 7.8 Conclusões gerais

Realizamos, pela primeira vez na literatura, a caracterização da componente de mais alta ionização dos *outflows* através da emissão coronal em um grupo de 7 galáxias rádio-silenciosas. Encontramos que o gás emissor de  $[\text{Fe VII}]$  se estende entre 638 pc e 2,8 kpc. Esse intervalo é até uma ordem de grandeza maior daqueles previamente reportados na literatura. Ainda, detectamos emissão de  $[\text{Fe X}]$  até 1,2 kpc da fonte central.

Para a galáxia Circinus produzimos modelos de fotoionização utilizando o código SUMA visando caracterizar os mecanismos de fotoionização no *outflow*. Claramente observamos necessidade de choques para reproduzir as razões de linhas encontradas na galáxia, principalmente nas regiões mais distantes do AGN e co-espaciais ao gás coronal.

Para todas as galáxias da amostra encontramos uma associação entre o eixo preferencial da emissão rádio e raio-X com o da emissão coronal. Além disso, nas galáxias que possuem imagens rádio de boa resolução verificamos que a emissão mais intensa de [Fe VII] aparenta contornar as regiões com alta emissão rádio. Esse resultado sugere que o jato deve estar comprimindo lateralmente o gás, aquecendo-o e como resultado, produzindo emissão de alta-ionização. O fato de encontrarmos uma associação entre as regiões de emissão coronal e quantidades menores de poeira corroboram essa hipótese. Nesse cenário, choques destroem a poeira presente ao longo do caminho de propagação do jato. Não descartamos a hipótese de contribuição de ventos estelares aos choques, principalmente em Circinus e NGC 1068.

Os resultados acima possuem suporte adicional da cinemática do gás coronal. Em todos os casos estudados, o gás de alta ionização segue movimentos desacoplados da rotação do disco, apresentando um padrão típico de um gás em *outflow*. Os mapas de canais indicam movimentos altamente turbulentos ( $\text{FWHM} > 200 \text{ km s}^{-1}$ ) associados às regiões próximas do jato-rádio. Esses resultados nos permitem sugerir a presença de um jato, alinhado ao cone, que passou perturbando o meio interestelar. Os resultados da emissão rádio, emissão raio-X, alta densidade, alta temperatura desses objetos dão suporte a essa hipótese.

Por fim, derivamos as taxas de *outflow* com valores entre  $0,042$  e  $4,3 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  e uma eficiência cinética entre  $0,0074\%$  e  $0,64\%$ . Os resultados indicam que os *outflows* associados à emissão coronal, e portanto ao jato rádio-emissor, se mostram relevantes mas não suficientes para expulsar o gás de formação estelar. É provável que o estudo de *outflow* em gás molecular e gás neutro podem fornecer uma parcela maior da massa de *outflow* suficiente para deter a formação estelar.

## 7.9 Perspectivas futuras

Nos próximos meses iremos submeter três artigos para as galáxias IC 5063, NGC 5643, NGC 3393, NGC 5728, ESO 428-14 e NGC 1068. No primeiro artigo, focaremos na análise da cinemática e extensão da emissão coronal. No segundo, serão apresentadas as propriedades físicas das galáxias, incluindo a massa, taxa e potencia cinética dos *outflows*. No terceiro, utilizaremos o código SUMA para modelar a contribuição da fotoionização pela fonte central e por choques, assim como foi realizado para Circinus.

Consideramos necessário ampliar a amostra de modo a incluir um número maior de AGNs com emissão rádio mais estendida e/ou mais compacta, além de combinar

com dados de outros instrumentos IFUs (SINFONI, NIFS, GMOS e SIFS) de modo a avaliar, de forma estatística, a associação entre emissão coronal, emissão rádio e potência do jato.

Outra frente de trabalho é a análise da população estelar ajustada nas galáxias. Os dados para isso já estão disponíveis, mas ainda não foram analisados.

Pretendemos também estender a análise realizada neste trabalho a uma amostra de galáxias tipo I. Neste trabalho, detectamos a emissão coronal em escalas de quiloparsecs em AGNs tipo II. Porém, uma pergunta interessante é se esse resultado é também válido para galáxias tipo I. Pretendemos quantificar qual a proporção da emissão coronal na região nuclear e estendida para verificar se existe uma fração desta emissão que não é observada em objetos de tipo II.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUTER, R.; ACCARDO, M.; AMORIM, A.; ANUGU, N.; ÁVILA, G.;  
AZOUAOU, N.; BENISTY, M.; BERGER, J. P.; BLIND, N.; BONNET, H.;  
BOURGET, P.; BRANDNER, W.; BRAST, R.; BURON, A.; BURTSCHER, L.;  
CASSAING, F.; CHAPRON, F.; CHOQUET, É.; CLÉNET, Y.; COLLIN, C.;  
FORESTO, V. C. D.; WIT, W. de; ZEEUW, P. T. de; DEEN, C.;  
DELPLANCKE-STRÖBELE, F.; DEMBET, R.; DERIE, F.; DEXTER, J.;  
DUVERT, G.; EBERT, M.; ECKART, A.; EISENHAUER, F.; ESSELBORN, M.;  
FÉDOU, P.; FINGER, G.; GARCIA, P.; DABO, C. E. G.; LOPEZ, R. G.;  
GENDRON, E.; GENZEL, R.; GILLESSEN, S.; GONTE, F.; GORDO, P.;  
GROULD, M.; GRÖZINGER, U.; GUIEU, S.; HAGUENAUER, P.; HANS, O.;  
HAUBOIS, X.; HAUG, M.; HAUSSMANN, F.; HENNING, T.; HIPPLER, S.;  
HORROBIN, M.; HUBER, A.; HUBERT, Z.; HUBIN, N.; HUMMEL, C. A.;  
JAKOB, G.; JANSSEN, A.; JOCHUM, L.; JOCOU, L.; KAUFER, A.;  
KELLNER, S.; KENDREW, S.; KERN, L.; KERVELLA, P.; KIEKEBUSCH, M.;  
KLEIN, R.; KOK, Y.; KOLB, J.; KULAS, M.; LACOUR, S.; LAPEYRÈRE, V.;  
LAZAREFF, B.; BOUQUIN, J. B. L.; LÈNA, P.; LENZEN, R.; LÉVÊQUE, S.;  
LIPPA, M.; MAGNARD, Y.; MEHRGAN, L.; MELLEIN, M.; MÉRAND, A.;  
MORENO-VENTAS, J.; MOULIN, T.; MÜLLER, E.; MÜLLER, F.; NEUMANN,  
U.; OBERTI, S.; OTT, T.; PALLANCA, L.; PANDURO, J.; PASQUINI, L.;  
PAUMARD, T.; PERCHERON, I.; PERRAUT, K.; PERRIN, G.; PFLÜGER, A.;  
PFUHL, O.; DUC, T. P.; PLEWA, P. M.; POPOVIC, D.; RABIEN, S.;  
RAMÍREZ, A.; RAMOS, J.; RAU, C.; RIQUELME, M.; ROHLOFF, R. R.;  
ROUSSET, G.; SANCHEZ-BERMUDEZ, J.; SCHEITHAUER, S.; SCHÖLLER,  
M.; SCHUHLER, N.; SPYROMILIO, J.; STRAUBMEIER, C.; STURM, E.;  
SUAREZ, M.; TRISTRAM, K. R. W.; VENTURA, N.; VINCENT, F.;  
WAISBERG, I.; WANK, I.; WEBER, J.; WIEPRECHT, E.; WIEST, M.;  
WIEZORREK, E.; WITTKOWSKI, M.; WOILLEZ, J.; WOLFF, B.; YAZICI, S.;  
ZIEGLER, D.; ZINS, G. First light for GRAVITY: Phase referencing optical  
interferometry for the Very Large Telescope Interferometer. **Astronomy and  
Astrophysics**, v. 602, p. A94, jun. 2017. 2

AKIYAMA, K.; ALBERDI, A.; ALEF, W.; ASADA, K.; AZULAY, R.; BACZKO,  
A.-K.; BALL, D.; BALOKOVIĆ, M.; BARRETT, J.; BINTLEY, D.;  
BLACKBURN, L.; BOLAND, W.; BOUMAN, K. L.; BOWER, G. C.; BREMER,  
M.; BRINKERINK, C. D.; BRISSENDEN, R.; BRITZEN, S.; BRODERICK,  
A. E.; BROGUIERE, D.; BRONZWAER, T.; BYUN, D.-Y.; CARLSTROM, J. E.;

CHAEI, A.; CHAN, C.-k.; CHATTERJEE, S.; CHATTERJEE, K.; CHEN, M.-T.; CHEN, Y.; CHO, I.; CHRISTIAN, P.; CONWAY, J. E.; CORDES, J. M.; CREW, G. B.; CUI, Y.; DAVELAAR, J.; LAURENTIS, M. D.; DEANE, R.; DEMPSEY, J.; DESVIGNES, G.; DEXTER, J.; DOELEMEN, S. S.; EATOUGH, R. P.; FALCKE, H.; FISH, V. L.; FOMALONT, E.; FRAGA-ENCINAS, R.; FREEMAN, W. T.; FRIBERG, P.; FROMM, C. M.; GÓMEZ, J. L.; GALISON, P.; GAMMIE, C. F.; GARCÍA, R.; GENTAZ, O.; GEORGIEV, B.; GODDI, C.; GOLD, R.; GU, M.; GURWELL, M.; HADA, K.; HECHT, M. H.; HESPER, R.; HO, L. C.; HO, P.; HONMA, M.; HUANG, C.-W. L.; HUANG, L.; HUGHES, D. H.; IKEDA, S.; INOUE, M.; ISSAOUN, S.; JAMES, D. J.; JANNUZI, B. T.; JANSSEN, M.; JETER, B.; JIANG, W.; JOHNSON, M. D.; JORSTAD, S.; JUNG, T.; KARAMI, M.; KARUPPUSAMY, R.; KAWASHIMA, T.; KEATING, G. K.; KETTENIS, M.; KIM, J.-Y.; KIM, J.; KIM, J.; KINO, M.; KOAY, J. Y.; KOCH, P. M.; KOYAMA, S.; KRAMER, M.; KRAMER, C.; KRICHBAUM, T. P.; KUO, C.-Y.; LAUER, T. R.; LEE, S.-S.; LI, Y.-R.; LI, Z.; LINDQVIST, M.; LIU, K.; LIUZZO, E.; LO, W.-P.; LOBANOV, A. P.; LOINARD, L.; LONSDALE, C.; LU, R.-S.; MACDONALD, N. R.; MAO, J.; MARKOFF, S.; MARRONE, D. P.; MARSCHER, A. P.; MARTÍ-VIDAL, I.; MATSUSHITA, S.; MATTHEWS, L. D.; MEDEIROS, L.; MENTEN, K. M.; MIZUNO, Y.; MIZUNO, I.; MORAN, J. M.; MORIYAMA, K.; MOSCIBRODZKA, M.; MÜLLER, C.; NAGAI, H.; NAGAR, N. M.; NAKAMURA, M.; NARAYAN, R.; NARAYANAN, G.; NATARAJAN, I.; NERI, R.; NI, C.; NOUTSOS, A.; OKINO, H.; OLIVARES, H.; ORTIZ-LEÓN, G. N.; OYAMA, T.; ÖZEL, F.; PALUMBO, D. C. M.; PATEL, N.; PEN, U.-L.; PESCE, D. W.; PIÉTU, V.; PLAMBECK, R.; POPSTEFANIJA, A.; PORTH, O.; PRATHER, B.; PRECIADO-LÓPEZ, J. A.; PSALTIS, D.; PU, H.-Y.; RAMAKRISHNAN, V.; RAO, R.; RAWLINGS, M. G.; RAYMOND, A. W.; REZZOLLA, L.; RIPPERDA, B.; ROELOFS, F.; ROGERS, A.; ROS, E.; ROSE, M.; ROSHANINESHAT, A.; ROTTMANN, H.; ROY, A. L.; RUSZCZYK, C.; RYAN, B. R.; RYGL, K. L. J.; SÁNCHEZ, S.; SÁNCHEZ-ARGUELLES, D.; SASADA, M.; SAVOLAINEN, T.; SCHLOERB, F. P.; SCHUSTER, K.-F.; SHAO, L.; SHEN, Z.; SMALL, D.; SOHN, B. W.; SOOHOO, J.; TAZAKI, F.; TIEDE, P.; TILANUS, R. P. J.; TITUS, M.; TOMA, K.; TORNE, P.; TRENT, T.; TRIPPE, S.; TSUDA, S.; BEMMEL, I. van; LANGEVELDE, H. J. van; ROSSUM, D. R. van; WAGNER, J.; WARDLE, J.; WEINTROUB, J.; WEX, N.; WHARTON, R.; WIELGUS, M.; WONG, G. N.; WU, Q.; YOUNG, K.; YOUNG, A.; YOUNSI, Z.; YUAN, F.; YUAN, Y.-F.; ZENSUS, J. A.; ZHAO, G.; ZHAO, S.-S.; ZHU, Z.; ALGABA, J.-C.; ALLARDI, A.; AMESTICA, R.; AN CZARSKI, J.; BACH, U.;

BAGANOFF, F. K.; BEAUDOIN, C.; BENSON, B. A.; BERTHOLD, R.;  
BLANCHARD, J. M.; BLUNDELL, R.; BUSTAMANTE, S.; CAPPALLO, R.;  
CASTILLO-DOMÍNGUEZ, E.; CHANG, C.-C.; CHANG, S.-H.; CHANG, S.-C.;  
CHEN, C.-C.; CHILSON, R.; CHUTER, T. C.; ROSADO, R. C.; COULSON,  
I. M.; CRAWFORD, T. M.; CROWLEY, J.; DAVID, J.; DEROME, M.;  
DEXTER, M.; DORNBUSCH, S.; DUDEVOIR, K. A.; DZIB, S. A.; ECKART,  
A.; ECKERT, C.; ERICKSON, N. R.; EVERETT, W. B.; FABER, A.; FARAH,  
J. R.; FATH, V.; FOLKERS, T. W.; FORBES, D. C.; FREUND, R.;  
GÓMEZ-RUIZ, A. I.; GALE, D. M.; GAO, F.; GEERTSEMA, G.; GRAHAM,  
D. A.; GREER, C. H.; GROSSLEIN, R.; GUETH, F.; HAGGARD, D.;  
HALVERSON, N. W.; HAN, C.-C.; HAN, K.-C.; HAO, J.; HASEGAWA, Y.;  
HENNING, J. W.; HERNÁNDEZ-GÓMEZ, A.; HERRERO-ILLANA, R.;  
HEYMINCK, S.; HIROTA, A.; HOGE, J.; HUANG, Y.-D.; IMPELLIZZERI,  
C. M. V.; JIANG, H.; KAMBLE, A.; KEISLER, R.; KIMURA, K.; KONO, Y.;  
KUBO, D.; KURODA, J.; LACASSE, R.; LAING, R. A.; LEITCH, E. M.; LI,  
C.-T.; LIN, L. C. C.; LIU, C.-T.; LIU, K.-Y.; LU, L.-M.; MARSON, R. G.;  
MARTIN-COCHER, P. L.; MASSINGILL, K. D.; MATULONIS, C.; MCCOLL,  
M. P.; MCWHIRTER, S. R.; MESSIAS, H.; MEYER-ZHAO, Z.; MICHALIK, D.;  
MONTAÑA, A.; MONTGOMERIE, W.; MORA-KLEIN, M.; MUDERS, D.;  
NADOLSKI, A.; NAVARRO, S.; NEILSEN, J.; NGUYEN, C. H.; NISHIOKA, H.;  
NORTON, T.; NOWAK, M. A.; NYSTROM, G.; OGAWA, H.; OSHIRO, P.;  
OYAMA, T.; PARSONS, H.; PAINE, S. N.; PEÑALVER, J.; PHILLIPS, N. M.;  
POIRIER, M.; PRADEL, N.; PRIMIANI, R. A.; RAFFIN, P. A.; RAHLIN, A. S.;  
REILAND, G.; RISACHER, C.; RUIZ, I.; SÁEZ-MADAÍN, A. F.; SASSELLA, R.;  
SCHELLART, P.; SHAW, P.; SILVA, K. M.; SHIOKAWA, H.; SMITH, D. R.;  
SNOW, W.; SOUCCAR, K.; SOUSA, D.; SRIDHARAN, T. K.; SRINIVASAN, R.;  
STAHM, W.; STARK, A. A.; STORY, K.; TIMMER, S. T.; VERTATSCHITSCH,  
L.; WALTHER, C.; WEI, T.-S.; WHITEHORN, N.; WHITNEY, A. R.; WOODY,  
D. P.; WOUTERLOOT, J. G. A.; WRIGHT, M.; YAMAGUCHI, P.; YU, C.-Y.;  
ZEBALLOS, M.; ZHANG, S.; ZIURYS, L. First M87 event horizon telescope  
results. I. the shadow of the supermassive black hole. **Astrophysical Journal,  
Letters**, v. 875, n. 1, p. L1, abr. 2019. 8

ALLOIN, D. **Physics of active galactic nuclei at all scales**. [S.l.: s.n.], 2006.  
2, 4

ALMEIDA, C. R.; RICCI, C. Nuclear obscuration in active galactic nuclei.  
**Nature Astronomy**, v. 1, p. 679–689, out. 2017. 2, 5

AMORIM, A.; BAUBÖCK, M.; BRANDNER, W.; BOLZER, M.; CLÉNET, Y.; DAVIES, R.; ZEEUW, P. T. de; DEXTER, J.; DRESCHER, A.; ECKART, A.; EISENHAUER, F.; SCHREIBER, N. M. F.; GAO, F.; GARCIA, P. J. V.; GENZEL, R.; GILLESSEN, S.; GRATADOUR, D.; HÖNIG, S.; KALTENBRUNNER, D.; KISHIMOTO, M.; LACOUR, S.; LUTZ, D.; MILLOUR, F.; NETZER, H.; OTT, T.; PAUMARD, T.; PERRAUT, K.; PERRIN, G.; PETERSON, B. M.; PETRUCCI, P. O.; PFUHL, O.; PRIETO, M. A.; ROUAN, D.; SANCHEZ-BERMUDEZ, J.; SHANGGUAN, J.; SHIMIZU, T.; SCHATSMANN, M.; STADLER, J.; STERNBERG, A.; STRAUB, O.; STRAUBMEIER, C.; STURM, E.; TACCONI, L. J.; TRISTRAM, K. R. W.; VERMOT, P.; FELLEBERG, S. von; WAISBERG, I.; WIDMANN, F.; WOILLEZ, J. The central parsec of NGC 3783: a rotating broad emission line region, asymmetric hot dust structure, and compact coronal line region. **arXiv e-prints**, p. arXiv:2102.00068, jan. 2021. 4, 106

ANTONUCCI, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 31, p. 473–521, jan. 1993. 2, 8

ANTONUCCI, R. R. J.; MILLER, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 297, p. 621–632, out. 1985. 8

APPENZELLER, I.; WAGNER, S. J. Forbidden high-ionization lines in QSO spectra. **Astronomy and Astrophysics**, v. 250, p. 57, out. 1991. 105

ASPLUND, M.; GREVESSE, N.; SAUVAL, A. J.; SCOTT, P. The chemical composition of the sun. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 47, n. 1, p. 481–522, set. 2009. 77

BACON, R.; ACCARDO, M.; ADJALI, L.; ANWAND, H.; BAUER, S.; BISWAS, I.; BLAIZOT, J.; BOUDON, D.; BRAU-NOGUE, S.; BRINCHMANN, J.; CAILLIER, P.; CAPOANI, L.; CAROLLO, C. M.; CONTINI, T.; COUDERC, P.; DAGUISÉ, E.; DEIRIES, S.; DELABRE, B.; DREIZLER, S.; DUBOIS, J.; DUPIEUX, M.; DUPUY, C.; EMSELLEM, E.; FECHNER, T.; FLEISCHMANN, A.; FRANÇOIS, M.; GALLOU, G.; GHARSA, T.; GLINDEMANN, A.; GOJAK, D.; GUIDERDONI, B.; HANSALI, G.; HAHN, T.; JARNO, A.; KELZ, A.; KOEHLER, C.; KOSMALKI, J.; LAURENT, F.; FLOCH, M. L.; LILLY, S. J.; LIZON, J. L.; LOUPIAS, M.; MANESCAU, A.; MONSTEIN, C.; NICKLAS, H.; OLAYA, J. C.; PARES, L.; PASQUINI, L.; PÉCONTAL-ROUSSET, A.; PELLÓ, R.; PETIT, C.; POPOW, E.; REISS, R.; REMILLIEUX, A.; RENAULT, E.; ROTH, M.; RUPPRECHT, G.; SERRE, D.; SCHAYE, J.; SOUCAIL, G.;

STEINMETZ, M.; STREICHER, O.; STUIK, R.; VALENTIN, H.; VERNET, J.; WEILBACHER, P.; WISOTZKI, L.; YERLE, N. The MUSE second-generation VLT instrument. In: MCLEAN, I. S.; RAMSAY, S. K.; TAKAMI, H. (Ed.). **Ground-based and airborne instrumentation for astronomy III**. [S.l.: s.n.], 2010. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 7735), p. 773508. 26

BACON, R.; ADAM, G.; BARANNE, A.; COURTES, G.; DUBET, D.; DUBOIS, J. P.; EMSELLEM, E.; FERRUIT, P.; GEORGELIN, Y.; MONNET, G.; PECONTAL, E.; ROUSSET, A.; SAY, F. 3D spectrography at high spatial resolution. I. concept and realization of the integral field spectrograph TIGER. **Astronomy and Astrophysics, Supplement**, v. 113, p. 347, out. 1995. 25

BACON, R.; COPIN, Y.; MONNET, G.; MILLER, B. W.; ALLINGTON-SMITH, J. R.; BUREAU, M.; CAROLLO, C. M.; DAVIES, R. L.; EMSELLEM, E.; KUNTSCHNER, H.; PELETIER, R. F.; VEROLME, E. K.; ZEEUW, P. T. de. The SAURON project - I. The panoramic integral-field spectrograph. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 326, n. 1, p. 23–35, set. 2001. 25, 35

BAÑADOS, E.; VENEMANS, B. P.; MAZZUCHELLI, C.; FARINA, E. P.; WALTER, F.; WANG, F.; DECARLI, R.; STERN, D.; FAN, X.; DAVIES, F. B.; HENNAWI, J. F.; SIMCOE, R. A.; TURNER, M. L.; RIX, H.-W.; YANG, J.; KELSON, D. D.; RUDIE, G. C.; WINTERS, J. M. An 800-million-solar-mass black hole in a significantly neutral Universe at a redshift of 7.5. **Nature**, v. 553, p. 473–476, jan. 2018. 6

BERSHADY, M. A.; ANDERSEN, D. R.; HARKER, J.; RAMSEY, L. W.; VERHEIJEN, M. A. W. SparsePak: A formatted fiber field unit for the WIYN telescope bench spectrograph. I. design, construction, and calibration. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, n. 820, p. 565–590, jun. 2004. 25

BERTOLA, F.; BETTONI, D.; DANZIGER, J.; SADLER, E.; SPARKE, L.; ZEEUW, T. de. Testing the gravitational field in elliptical galaxies: NGC 5077. **Astrophysical Journal**, v. 373, p. 369, jun. 1991. 62

BLANDFORD, R. D.; NETZER, H.; WOLTJER, L.; COURVOISIER, T. J.-L.; MAYOR, M. (Ed.). **Active galactic nuclei**. [S.l.: s.n.], 1990. 97 p. 4

BUNDY, K.; BERSHADY, M. A.; LAW, D. R.; YAN, R.; DRORY, N.;  
MACDONALD, N.; WAKE, D. A.; CHERINKA, B.; SÁNCHEZ-GALLEGO,  
J. R.; WEIJMANS, A.-M.; THOMAS, D.; TREMONTI, C.; MASTERS, K.;  
COCCATO, L.; DIAMOND-STANIC, A. M.; ARAGÓN-SALAMANCA, A.;  
AVILA-REESE, V.; BADENES, C.; FALCÓN-BARROSO, J.; BELFIORE, F.;  
BIZYAEV, D.; BLANC, G. A.; BLAND-HAWTHORN, J.; BLANTON, M. R.;  
BROWNSTEIN, J. R.; BYLER, N.; CAPPELLARI, M.; CONROY, C.;  
DUTTON, A. A.; EMSELLEM, E.; ETHERINGTON, J.; FRINCHABOY, P. M.;  
FU, H.; GUNN, J. E.; HARDING, P.; JOHNSTON, E. J.; KAUFFMANN, G.;  
KINEMUCHI, K.; KLAENE, M. A.; KNAPEN, J. H.; LEAUTHAUD, A.; LI, C.;  
LIN, L.; MAIOLINO, R.; MALANUSHENKO, V.; MALANUSHENKO, E.; MAO,  
S.; MARASTON, C.; MCDERMID, R. M.; MERRIFIELD, M. R.; NICHOL,  
R. C.; ORAVETZ, D.; PAN, K.; PAREJKO, J. K.; SANCHEZ, S. F.;  
SCHLEGEL, D.; SIMMONS, A.; STEELE, O.; STEINMETZ, M.; THANJAVUR,  
K.; THOMPSON, B. A.; TINKER, J. L.; BOSCH, R. C. E. van den; WESTFALL,  
K. B.; WILKINSON, D.; WRIGHT, S.; XIAO, T.; ZHANG, K. Overview of the  
SDSS-IV MaNGA survey: mapping nearby galaxies at apache point observatory.  
**Astrophysical Journal**, v. 798, n. 1, p. 7, jan. 2015. 25

CANO-DÍAZ, M.; MAIOLINO, R.; MARCONI, A.; NETZER, H.; SHEMMER,  
O.; CRESCI, G. Observational evidence of quasar feedback quenching star  
formation at high redshift. **Astronomy and Astrophysics**, v. 537, p. L8, jan.  
2012. 54, 71, 146

CAPETTI, A.; AXON, D. J.; MACCHETTO, F.; SPARKS, W. B.;  
BOKSENBERG, A. Radio outflows and the origin of the narrow-line region in  
seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 469, p. 554, out. 1996. 4

CAPPELLARI, M.; EMSELLEM, E. Parametric recovery of line-of-sight velocity  
distributions from absorption-line spectra of galaxies via penalized likelihood.  
**Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 138–147,  
fev. 2004. 47

CARDELLI, J. A.; CLAYTON, G. C.; MATHIS, J. S. The relationship between  
infrared, optical, and ultraviolet extinction. **Astrophysical Journal**, v. 345,  
p. 245, out. 1989. 40

Cardelli, J. A.; Clayton, G. C.; Mathis, J. S. The relationship between infrared,  
optical, and ultraviolet extinction. **Astrophysical Journal**, v. 345, p. 245, out.  
1989. 43

COMBES, F. Models of AGN feedback. In: ZIEGLER, B. L.; COMBES, F.; DANNERBAUER, H.; VERDUGO, M. (Ed.). **Galaxies in 3D across the Universe**. [S.l.: s.n.], 2015. v. 309, p. 182–189. [12](#)

COMBES, F.; GARCÍA-BURILLO, S.; CASASOLA, V.; HUNT, L.; KRIPS, M.; BAKER, A. J.; BOONE, F.; ECKART, A.; MARQUEZ, I.; NERI, R.; SCHINNERER, E.; TACCONI, L. J. ALMA observations of feeding and feedback in nearby Seyfert galaxies: an AGN-driven outflow in NGC 1433. **Astronomy and Astrophysics**, v. 558, p. A124, out. 2013. [15](#)

CONTINI, M. Observed and predicted Ly-alpha and UV lines for a sample of galaxies at redshifts z3.7. **ArXiv e-prints**, abr. 2015. [47](#), [48](#), [117](#)

CONTINI, M.; ALDROVANDI, S. M. V. Composite models for the narrow emission line region of active galactic nuclei. I - the infalling filament. **Astronomy and Astrophysics**, v. 127, p. 15–24, out. 1983. [47](#)

CONTINI, M.; PRIETO, M. A.; VIEGAS, S. M. Gas and dust emission from the nuclear region of the circinus galaxy. **Astrophysical Journal**, v. 505, n. 2, p. 621–633, out. 1998. [78](#)

CONTINI, M.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; VIEGAS, S. M. The narrow line region of Ark 564. **Astronomy and Astrophysics**, v. 408, p. 101–109, set. 2003. [47](#), [48](#)

COOKE, A. J.; BALDWIN, J. A.; FERLAND, G. J.; NETZER, H.; WILSON, A. S. The narrow-line region in the seyfert 2 galaxy NGC 3393. **Astrophysical Journal, Supplement**, v. 129, p. 517–545, ago. 2000. [32](#), [33](#)

COX, D. P. Cooling and evolution of a supernova remnant. **Astrophysical Journal**, v. 178, p. 159–168, nov. 1972. [48](#)

CRESCI, G.; MARCONI, A.; ZIBETTI, S.; RISALITI, G.; CARNIANI, S.; MANNUCCI, F.; GALLAZZI, A.; MAIOLINO, R.; BALMAVERDE, B.; BRUSA, M.; CAPETTI, A.; CICONE, C.; FERUGLIO, C.; BLAND-HAWTHORN, J.; NAGAO, T.; OLIVA, E.; SALVATO, M.; SANI, E.; TOZZI, P.; URRUTIA, T.; VENTURI, G. The MAGNUM survey: positive feedback in the nuclear region of NGC 5643 suggested by MUSE. **Astronomy and Astrophysics**, v. 582, p. A63, out. 2015. [19](#), [23](#)

CURRAN, S. J.; JOHANSSON, L. E. B.; RYDBECK, G.; BOOTH, R. S. A molecular ring in the Circinus galaxy. **Astronomy and Astrophysics**, v. 338, p. 863–873, out. 1998. [69](#)

DASYRA, K. M.; BOSTROM, A. C.; COMBES, F.; VLAHAKIS, N. A radio jet drives a molecular and atomic gas outflow in multiple regions within one square kiloparsec of the nucleus of the nearby galaxy IC5063. **Astrophysical Journal**, v. 815, p. 34, dez. 2015. [16](#)

DASYRA, K. M.; COMBES, F.; OOSTERLOO, T.; OONK, J. B. R.; MORGANTI, R.; SALOMÉ, P.; VLAHAKIS, N. ALMA reveals optically thin, highly excited CO gas in the jet-driven winds of the galaxy IC 5063. **Astronomy and Astrophysics**, v. 595, p. L7, nov. 2016. [16](#)

DAVIES, R.; BARON, D.; SHIMIZU, T.; NETZER, H.; BURTSCHER, L.; ZEEUW, P. T. de; GENZEL, R.; HICKS, E. K. S.; KOSS, M.; LIN, M. Y.; LUTZ, D.; MACIEJEWSKI, W.; MÜLLER-SÁNCHEZ, F.; XIVRY, G. Orban de; RICCI, C.; RIFFEL, R.; RIFFEL, R. A.; ROSARIO, D.; SCHARTMANN, M.; SCHNORR-MÜLLER, A.; SHANGGUAN, J.; STERNBERG, A.; STURM, E.; STORCHI-BERGMANN, T.; TACCONI, L.; VEILLEUX, S. Ionized outflows in local luminous AGN: what are the real densities and outflow rates? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 498, n. 3, p. 4150–4177, nov. 2020. [149](#)

DAVIES, R. I.; MACIEJEWSKI, W.; HICKS, E. K. S.; EMSELLEM, E.; ERWIN, P.; BURTSCHER, L.; DUMAS, G.; LIN, M.; MALKAN, M. A.; MÜLLER-SÁNCHEZ, F.; XIVRY, G. O.; ROSARIO, D. J.; TRAN, A. Fueling active galactic nuclei. II. spatially resolved molecular inflows and outflows. **Astrophysical Journal**, v. 792, p. 101, set. 2014. [32](#)

DAVIES, R. I.; SUGAI, H.; WARD, M. J. Star formation in the circumnuclear environment of NGC1068. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 300, n. 2, p. 388–396, out. 1998. [116](#)

DAVIES, R. L.; ALLINGTON-SMITH, J. R.; BETTESS, P.; CHADWICK, E.; CONTENT, R.; DODSWORTH, G. N.; HAYNES, R.; LEE, D.; LEWIS, I. J.; WEBSTER, J.; ATAD, E.; BEARD, S. M.; ELLIS, M.; HASTINGS, P. R.; WILLIAMS, P. R.; BOND, T.; CRAMPTON, D.; DAVIDGE, T. J.; FLETCHER, M.; LECKIE, B.; MORBEY, C. L.; MUROWINSKI, R. G.; ROBERTS, S.; SADDLEMYER, L. K.; SEBESTA, J.; STILBURN, J. R.; SZETO, K. GMOS: the

GEMINI multiple object spectrographs. In: ARDEBERG, A. L. (Ed.). **Optical telescopes of today and tomorrow**. [S.l.: s.n.], 1997. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 2871), p. 1099–1106. 25

DOKUCHAEV, V. I.; EROSHENKO, Y. N.; RUBIN, S. G. Origin of supermassive black holes. **ArXiv e-prints**, set. 2007. 7

DORS, O. L.; CONTINI, M.; RIFFEL, R. A.; PÉREZ-MONTERO, E.; KRABBE, A. C.; CARDACI, M. V.; HÄGELE, G. F. 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. 47, 48

DORS, O. L.; RIFFEL, R. A.; CARDACI, M. V.; HÄGELE, G. F.; KRABBE, Á. C.; PÉREZ-MONTERO, E.; RODRIGUES, I. X-rays as the dominant excitation mechanism of [Fe II] and H<sub>2</sub> emission lines in active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 422, n. 1, p. 252–260, maio 2012. 17

DU, P.; LU, K.-X.; HU, C.; QIU, J.; LI, Y.-R.; HUANG, Y.-K.; WANG, F.; BAI, J.-M.; BIAN, W.-H.; YUAN, Y.-F.; HO, L. C.; WANG, J.-M.; COLLABORATION, S. Supermassive Black Holes with High Accretion Rates in Active Galactic Nuclei. VI. Velocity-resolved Reverberation Mapping of the H $\beta$  Line. **Astrophysical Journal**, v. 820, n. 1, p. 27, mar. 2016. 2

DURRÉ, M.; MOULD, J. The AGN Ionization Cones of NGC 5728 : II - Kinematics. **ArXiv e-prints**, nov. 2018. 33

\_\_\_\_\_. The AGN ionization cones of NGC 5728. I. excitation and nuclear structure. **Astrophysical Journal**, v. 867, n. 2, p. 149, nov. 2018. 33, 106, 107, 117, 120

EISENHAUER, F.; ABUTER, R.; BICKERT, K.; BIANCAT-MARCHET, F.; BONNET, H.; BRYNNEL, J.; CONZELMANN, R. D.; DELABRE, B.; DONALDSON, R.; FARINATO, J.; FEDRIGO, E.; GENZEL, R.; HUBIN, N. N.; ISERLOHE, C.; KASPER, M. E.; KISSLER-PATIG, M.; MONNET, G. J.; ROEHRLE, C.; SCHREIBER, J.; STROEBELE, S.; TECZA, M.; THATTE, N. A.; WEISZ, H. SINFONI - Integral field spectroscopy at 50 milli-arcsecond resolution with the ESO VLT. In: IYE, M.; MOORWOOD, A. F. M. (Ed.). **Instrument design and performance for optical/infrared ground-based**

telescopes. [S.l.: s.n.], 2003. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 4841), p. 1548–1561. 26

ELMOUTTIE, M.; HAYNES, R. F.; JONES, K. L.; SADLER, E. M.; EHLE, M. Radio continuum evidence for nuclear outflow in the Circinus galaxy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 297, n. 4, p. 1202–1218, jul. 1998. 53, 64, 66, 91, 117

ERKENS, U.; APPENZELLER, I.; WAGNER, S. The nature of the FHIL winds from AGN. **Astronomy and Astrophysics**, v. 323, p. 707–716, jul. 1997. 105

ESO. **EsoRex: ESO recipe execution tool**. abr. 2015. ascl:1504.003 p. 26

ESO, E. S. O. **Integral Field Units**. [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/ifu/?lang>>. Acesso em: 20 jan. 2021. 17, 35

ESQUEJ, P.; ALONSO-HERRERO, A.; GONZÁLEZ-MARTÍN, O.; HÖNIG, S. F.; HERNÁN-CABALLERO, A.; ROCHE, P.; ALMEIDA, C. R.; MASON, R. E.; DÍAZ-SANTOS, T.; LEVENSON, N. A.; ARETXAGA, I.; ESPINOSA, J. M. R.; PACKHAM, C. Nuclear star formation activity and black hole accretion in nearby seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 780, p. 86, jan. 2014. 31, 53

FABBIANO, G.; ELVIS, M.; PAGGI, A.; KAROVSKA, M.; MAKSYM, W. P.; RAYMOND, J.; RISALITI, G.; WANG, J. Discovery of a kiloparsec extended hard X-ray continuum and Fe-K $\alpha$  from the compton thick AGN ESO 428-G014. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 842, n. 1, p. L4, jun. 2017. 145

FABBIANO, G.; PAGGI, A.; KAROVSKA, M.; ELVIS, M.; MAKSYM, W. P.; RISALITI, G.; WANG, J. Deep chandra observations of ESO 428-G014. II. spectral properties and morphology of the large-scale extended X-ray emission. **Astrophysical Journal**, v. 855, n. 2, p. 131, mar. 2018. 34, 120

FABBIANO, G.; SIEMIGINOWSKA, A.; PAGGI, A.; ELVIS, M.; VOLONTERI, M.; MAYER, L.; KAROVSKA, M.; MAKSYM, W. P.; RISALITI, G.; WANG, J. Deep Chandra Observations of ESO 428-G014. IV. The Morphology of the Nuclear Region in the Hard Continuum and Fe K $\alpha$  Line. **Astrophysical Journal**, v. 870, n. 2, p. 69, jan. 2019. 33

- FALCKE, H.; WILSON, A. S.; SIMPSON, C.; BOWER, G. A. Helical strands in the jetlike narrow-line region of ESO 428-G14. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 470, p. L31, out. 1996. [33](#)
- FANAROFF, B. L.; RILEY, J. M. The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 167, p. 31P–36P, maio 1974. [6](#), [13](#)
- FATHI, K.; STORCHI-BERGMANN, T.; RIFFEL, R. A.; WINGE, C.; AXON, D. J.; ROBINSON, A.; CAPETTI, A.; MARCONI, A. Streaming Motions toward the Supermassive Black Hole in NGC 1097. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 641, n. 1, p. L25–L28, abr. 2006. [18](#)
- FERGUSON, J. W.; KORISTA, K. T.; FERLAND, G. J. Physical conditions of the coronal line region in seyfert galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 110, p. 287–297, jun. 1997. [15](#), [133](#)
- FERNANDES, R. C.; MATEUS, A.; SODRÉ, L.; STASIŃSKA, G.; GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of sloan digital sky survey galaxies - I. spectral synthesis method. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 358, n. 2, p. 363–378, abr. 2005. [41](#)
- FERRARESE, L.; MERRITT, D. A fundamental relation between supermassive black holes and their host galaxies. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 539, p. L9–L12, ago. 2000. [9](#), [10](#)
- FINLEZ, C.; NAGAR, N. M.; STORCHI-BERGMANN, T.; SCHNORR-MÜLLER, A.; RIFFEL, R. A.; LENA, D.; MUNDELL, C. G.; ELVIS, M. S. The complex jet- and bar-perturbed kinematics in NGC 3393 as revealed with ALMA and GEMINI-GMOS/IFU. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 479, p. 3892–3908, set. 2018. [33](#), [148](#)
- FOR, B. Q.; KORIBALSKI, B. S.; JARRETT, T. H. Gas and star formation in the Circinus galaxy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 425, n. 3, p. 1934–1950, set. 2012. [40](#), [53](#)
- FREEMAN, K. C.; KARLSSON, B.; LYNGA, G.; BURRELL, J. F.; WOERDEN, H. van; GOSS, W. M.; MEBOLD, U. A large new galaxy in Circinus. **Astronomy and Astrophysics**, v. 55, p. 445–458, mar. 1977. [30](#), [53](#)
- GARCÍA-BURILLO, S.; COMBES, F.; ALMEIDA, C. R.; USERO, A.; KRIPS, M.; ALONSO-HERRERO, A.; AALTO, S.; CASASOLA, V.; HUNT, L. K.;

MARTÍN, S.; VITI, S.; COLINA, L.; COSTAGLIOLA, F.; ECKART, A.; FUENTE, A.; HENKEL, C.; MÁRQUEZ, I.; NERI, R.; SCHINNERER, E.; TACCONI, L. J.; WERF, P. P. van der. ALMA resolves the torus of NGC 1068: continuum and molecular line emission. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 823, n. 1, p. L12, maio 2016. [34](#)

GARCÍA-BURILLO, S.; COMBES, F.; USERO, A.; AALTO, S.; KRIPS, M.; VITI, S.; ALONSO-HERRERO, A.; HUNT, L. K.; SCHINNERER, E.; BAKER, A. J.; BOONE, F.; CASASOLA, V.; COLINA, L.; COSTAGLIOLA, F.; ECKART, A.; FUENTE, A.; HENKEL, C.; LABIANO, A.; MARTÍN, S.; MÁRQUEZ, I.; MULLER, S.; PLANESAS, P.; ALMEIDA, C. R.; SPAANS, M.; TACCONI, L. J.; WERF, P. P. van der. Molecular line emission in NGC 1068 imaged with ALMA. I. An AGN-driven outflow in the dense molecular gas. **Astronomy and Astrophysics**, v. 567, p. A125, jul. 2014. [15](#)

GARCÍA-BURILLO, S.; COMBES, F.; USERO, A.; AALTO, S.; KRIPS, M.; VITI, S.; ALONSO-HERRERO, A.; HUNT, L. K.; SCHINNERER, E.; BAKER, A. J.; BOONE, F.; CASASOLA, V.; COLINA, L.; COSTAGLIOLA, F.; ECKART, A.; FUENTE, A.; HENKEL, C.; LABIANO, A.; MARTÍN, S.; MÁRQUEZ, I.; MULLER, S.; PLANESAS, P.; ALMEIDA, C. R.; SPAANS, M.; TACCONI, L. J.; WERF, P. P. van der. Molecular line emission in NGC 1068 imaged with ALMA. I. An AGN-driven outflow in the dense molecular gas. **Astronomy and Astrophysics**, v. 567, p. A125, jul. 2014. [141](#)

GARCÍA-LORENZO, B.; ARRIBAS, S.; MEDIAVILLA, E. INTEGRAL: A simple and friendly integral field unit available at the WHT. **The Newsletter of the Isaac Newton Group of Telescopes**, v. 3, p. 25–28, set. 2000. [25](#)

GASPARI, M.; RUSZKOWSKI, M.; SHARMA, P. Cause and effect of feedback: multiphase gas in cluster cores heated by AGN jets. **Astrophysical Journal**, v. 746, n. 1, p. 94, fev. 2012. [12](#)

GEBHARDT, K.; BENDER, R.; BOWER, G.; DRESSLER, A.; FABER, S. M.; FILIPPENKO, A. V.; GREEN, R.; GRILLMAIR, C.; HO, L. C.; KORMENDY, J.; LAUER, T. R.; MAGORRIAN, J.; PINKNEY, J.; RICHSTONE, D.; TREMAINE, S. A relationship between nuclear black hole mass and galaxy velocity dispersion. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 539, p. L13–L16, ago. 2000. [9](#), [10](#)

GHISELLINI, G. Extragalactic relativistic jets. In: AHARONIAN, F. A.; HOFMANN, W.; RIEGER, F. M. (Ed.). **25th Texas Symposium on**

**Relativistic AstroPhysics (Texas 2010)**. [S.l.: s.n.], 2011. (American Institute of Physics Conference Series, v. 1381), p. 180–198. [6](#)

GOLEV, V.; YANKULOVA, I.; BONEV, T.; JOCKERS, K. Evidence for biconical coronal-line region in NGC 3516. **Astrophysical Letters and Communications**, v. 29, p. 239–247, jul. 1994. [105](#)

\_\_\_\_\_. New narrow-band imaging of the extended emission-line region in the Seyfert galaxy NGC 3516. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 273, n. 1, p. 129–138, mar. 1995. [105](#)

GÓMEZ-GUIJARRO, C.; GONZÁLEZ-MARTÍN, O.; ALMEIDA, C. R.; RODRÍGUEZ-ESPINOSA, J. M.; GALLEGO, J. A comparison between the soft X-ray and [O III] morphologies of active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 469, n. 3, p. 2720–2736, ago. 2017. [32](#), [120](#)

GOODMAN, J. Self-gravity and quasi-stellar object discs. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 339, n. 4, p. 937–948, mar. 2003. [14](#)

GOULDING, A. D.; ALEXANDER, D. M.; LEHMER, B. D.; MULLANEY, J. R. Towards a complete census of active galactic nuclei in nearby galaxies: the incidence of growing black holes. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 406, n. 1, p. 597–611, jul. 2010. [32](#)

GRAHAM, A. W. Galaxy bulges and their massive black holes: a review. In: LAURIKAINEN, E.; PELETIER, R.; GADOTTI, D. (Ed.). **Galactic bulges**. [S.l.: s.n.], 2016. (Astrophysics and Space Science Library, v. 418), p. 263. [10](#)

GREENE, J. E.; ZAKAMSKA, N. L.; HO, L. C.; BARTH, A. J. Feedback in luminous obscured quasars. **Astrophysical Journal**, v. 732, n. 1, p. 9, maio 2011. [15](#)

GREENHILL, L. J.; BOOTH, R. S.; ELLINGSEN, S. P.; HERRNSTEIN, J. R.; JAUNCEY, D. L.; MCCULLOCH, P. M.; MORAN, J. M.; NORRIS, R. P.; REYNOLDS, J. E.; TZIOUMIS, A. K. A warped accretion disk and wide-angle outflow in the inner parsec of the circinus galaxy. **Astrophysical Journal**, v. 590, p. 162–173, jun. 2003. [31](#), [53](#)

GÜLTEKIN, K.; RICHSTONE, D. O.; GEBHARDT, K.; LAUER, T. R.; TREMAINE, S.; ALLER, M. C.; BENDER, R.; DRESSLER, A.; FABER, S. M.; FILIPPENKO, A. V.; GREEN, R.; HO, L. C.; KORMENDY, J.; MAGORRIAN, J.; PINKNEY, J.; SIOPIS, C. The M- $\sigma$  and M-L relations in galactic bulges, and

determinations of their intrinsic scatter. **Astrophysical Journal**, v. 698, p. 198–221, jun. 2009. [10](#)

HABOUZIT, M.; GENEL, S.; SOMERVILLE, R. S.; KOCEVSKI, D.; HIRSCHMANN, M.; DEKEL, A.; CHOI, E.; NELSON, D.; PILLEPICH, A.; TORREY, P.; HERNQUIST, L.; VOGELSBERGER, M.; WEINBERGER, R.; SPRINGEL, V. Linking galaxy structural properties and star formation activity to black hole activity with IllustrisTNG. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 484, n. 4, p. 4413–4443, abr. 2019. [12](#)

HARRISON, C. M.; COSTA, T.; TADHUNTER, C. N.; FLÜTSCH, A.; KAKKAD, D.; PERNA, M.; VIETRI, G. AGN outflows and feedback twenty years on. **Nature Astronomy**, v. 2, p. 198–205, fev. 2018. [13](#), [148](#)

HECKMAN, T. M. Peculiar nuclei and their relation to galaxy type. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 90, p. 241–243, jun. 1978. [4](#), [5](#)

\_\_\_\_\_. An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies. activity in normal galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v. 500, p. 187–199, jul. 1980. [7](#)

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, p. 589–660, ago. 2014. [12](#), [14](#)

HICKOX, R. C.; ALEXANDER, D. M. Obscured active galactic nuclei. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 56, p. 625–671, set. 2018. [2](#)

HO, L. C. Nuclear activity in nearby galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 46, p. 475–539, set. 2008. [1](#)

HOLT, J.; TADHUNTER, C.; MORGANTI, R.; BELLAMY, M.; DELGADO, R. M. G.; TZIOUMIS, A.; INSKIP, K. J. The co-evolution of the obscured quasar PKS 1549-79 and its host galaxy: evidence for a high accretion rate and warm outflow. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 370, n. 4, p. 1633–1650, ago. 2006. [146](#)

HUSEMANN, B.; SCHARWÄCHTER, J.; DAVIS, T. A.; PÉREZ-TORRES, M.; SMIRNOVA-PINCHUKOVA, I.; TREMBLAY, G. R.; KRUMPE, M.; COMBES, F.; BAUM, S. A.; BUSCH, G.; CONNOR, T.; CROOM, S. M.; GASPARI, M.; KRAFT, R. P.; O'DEA, C. P.; POWELL, M.; SINGHA, M.; URRUTIA, T. The

Close AGN Reference Survey (CARS). a massive multi-phase outflow impacting the edge-on galaxy HE 1353-1917. **Astronomy and Astrophysics**, v. 627, p. A53, jul. 2019. 19

ICHIKAWA, K.; PACKHAM, C.; ALMEIDA, C. R.; RAMOS, A. A.; ALONSO-HERRERO, A.; GONZÁLEZ-MARTÍN, O.; LOPEZ-RODRIGUEZ, E.; UEDA, Y.; DÍAZ-SANTOS, T.; ELITZUR, M.; HÖNIG, S. F.; IMANISHI, M.; LEVENSON, N. A.; MASON, R. E.; PERLMAN, E. S.; ALSIP, C. D. The differences in the torus geometry between hidden and non-hidden broad line active galactic nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 803, n. 2, p. 57, abr. 2015. 32

JARVIS, M. E.; HARRISON, C. M.; THOMSON, A. P.; CIRCOSTA, C.; MAINIERI, V.; ALEXANDER, D. M.; EDGE, A. C.; LANSBURY, G. B.; MOLYNEUX, S. J.; MULLANEY, J. R. Prevalence of radio jets associated with galactic outflows and feedback from quasars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 485, n. 2, p. 2710–2730, maio 2019. 13

KAUFFMANN, G.; HECKMAN, T. M.; TREMONTI, C.; BRINCHMANN, J.; CHARLOT, S.; WHITE, S. D. M.; RIDGWAY, S. E.; BRINKMANN, J.; FUKUGITA, M.; HALL, P. B.; IVEZIĆ, V. Z.; RICHARDS, G. T.; SCHNEIDER, D. P. The host galaxies of active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 346, p. 1055–1077, dez. 2003. 7

KELLERMANN, K. I.; SRAMEK, R.; SCHMIDT, M.; SHAFFER, D. B.; GREEN, R. VLA observations of objects in the palomar bright quasar survey. **Astronomical Journal**, v. 98, p. 1195, out. 1989. 6

KELZ, A.; VERHEIJEN, M.; ROTH, M. M.; LAUX, U.; BAUER, S.-M. Development of the wide-field IFU PPak. In: MOORWOOD, A. F. M.; IYE, M. (Ed.). **Ground-based instrumentation for astronomy**. [S.l.: s.n.], 2004. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 5492), p. 719–730. 25

KEWLEY, L. J.; DOPITA, M. A.; SUTHERLAND, R. S.; HEISLER, C. A.; TREVENA, J. Theoretical modeling of starburst galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 556, n. 1, p. 121–140, jul. 2001. 115

KONDRATKO, P. T.; GREENHILL, L. J.; MORAN, J. M. The parsec-scale accretion disk in NGC 3393. **Astrophysical Journal**, v. 678, p. 87–95, maio 2008. 32

KORMENDY, J.; HO, L. C. Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 51, p. 511–653, ago. 2013. 10, 11, 34

KORMENDY, J.; RICHTON, D. Inward bound—the search for supermassive black holes in galactic nuclei. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 33, p. 581, 1995. 10

KOSS, M. J.; ROMERO-CANIZALES, C.; BARONCHELLI, L.; TENG, S. H.; BALOKOVIĆ, M.; PUCETTI, S.; BAUER, F. E.; ARÉVALO, P.; ASSEF, R.; BALLANTYNE, D. R.; BRANDT, W. N.; BRIGHTMAN, M.; COMASTRI, A.; GANDHI, P.; HARRISON, F. A.; LUO, B.; SCHAWINSKI, K.; STERN, D.; TREISTER, E. Broadband observations of the compton-thick nucleus of NGC 3393. **Astrophysical Journal**, v. 807, n. 2, p. 149, jul. 2015. 32

KUKULA, M. J.; PEDLAR, A.; BAUM, S. A.; O'DEA, C. P. High-resolution radio observations of the CfA seyfert sample -I. the observations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 276, n. 4, p. 1262–1280, out. 1995. 117

LEIPSKI, C.; FALCKE, H.; BENNETT, N.; HÜTTEMEISTER, S. The radio structure of radio-quiet quasars. **Astronomy and Astrophysics**, v. 455, n. 1, p. 161–172, ago. 2006. 32, 117

LODATO, G.; BERTIN, G. Non-Keplerian rotation in the nucleus of <ASTROBJ>NGC 1068</ASTROBJ>: Evidence for a massive accretion disk? **Astronomy and Astrophysics**, v. 398, p. 517–524, fev. 2003. 34

MAGORRIAN, J.; TREMAINE, S.; RICHTON, D.; BENDER, R.; BOWER, G.; DRESSLER, A.; FABER, S. M.; GEBHARDT, K.; GREEN, R.; GRILLMAIR, C.; KORMENDY, J.; LAUER, T. The demography of massive dark objects in galaxy centers. **Astronomical Journal**, v. 115, p. 2285–2305, jun. 1998. 10

MAIOLINO, R.; ALONSO-HERRERO, A.; ANDERS, S.; QUILLEN, A.; RIEKE, M. J.; RIEKE, G. H.; TACCONI-GARMAN, L. E. Discovery of a nuclear gas bar feeding the active nucleus in circinus. **Astrophysical Journal**, v. 531, n. 1, p. 219–231, mar. 2000. 148

MAIOLINO, R.; KRABBE, A.; THATTE, N.; GENZEL, R. Seyfert activity and nuclear star formation in the circinus galaxy. **Astrophysical Journal**, v. 493, n. 2, p. 650–665, jan. 1998. 31

MAIOLINO, R.; RUSSELL, H. R.; FABIAN, A. C.; CARNIANI, S.; GALLAGHER, R.; CAZZOLI, S.; ARRIBAS, S.; BELFIORE, F.; BELLOCCHI, E.; COLINA, L.; CRESCI, G.; ISHIBASHI, W.; MARCONI, A.; MANNUCCI, F.; OLIVA, E.; STURM, E. Star formation inside a galactic outflow. **Nature**, v. 544, p. 202–206, mar. 2017. [12](#)

MAKSYM, W. P.; FABBIANO, G.; ELVIS, M.; KAROVSKA, M.; PAGGI, A.; RAYMOND, J.; WANG, J.; STORCHI-BERGMANN, T. CHEERS Results from NGC 3393. II. investigating the extended narrow-line region using deep chandra observations and hubble space telescope narrow-line imaging. **Astrophysical Journal**, v. 844, n. 1, p. 69, jul. 2017. [120](#)

MARCONI, A.; MOORWOOD, A. F. M.; ORIGLIA, L.; OLIVA, E. A prominent ionization cone and starburst ring in the nearby Circinus galaxy. **The Messenger**, v. 78, p. 20–24, dez. 1994. [69](#)

MARINELLO, M.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; GARCIA-RISSMANN, A.; SIGUT, T. A. A.; PRADHAN, A. K. The Fe II emission in active galactic nuclei: excitation mechanisms and location of the emitting region. **Astrophysical Journal**, v. 820, n. 2, p. 116, abr. 2016. [2](#)

MATT, G.; FABIAN, A. C.; GUAINAZZI, M.; IWASAWA, K.; BASSANI, L.; MALAGUTI, G. The X-ray spectra of Compton-thick Seyfert 2 galaxies as seen by BeppoSAX. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 318, n. 1, p. 173–179, out. 2000. [31](#)

MATTEO, T. D.; SPRINGEL, V.; HERNQUIST, L. Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. **Nature**, v. 433, p. 604–607, fev. 2005. [13](#)

MAY, D.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; PRIETO, M. A.; FERNÁNDEZ-ONTIVEROS, J. A.; DIAZ, Y.; MAZZALAY, X. Powerful mechanical-driven outflows in the central parsecs of the low-luminosity active galactic nucleus ESO 428-G14. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 481, p. L105–L109, nov. 2018. [13](#), [17](#), [24](#), [33](#), [34](#), [106](#), [107](#), [112](#), [148](#)

MAZZALAY, X.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; KOMOSSA, S.; MCGREGOR, P. J. Resolving the coronal line region of NGC 1068 with near-infrared integral field spectroscopy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 430, p. 2411–2426, abr. 2013. [106](#), [113](#)

MCGREGOR, P. J.; HART, J.; CONROY, P. G.; PFITZNER, M. L.; BLOXHAM, G. J.; JONES, D. J.; DOWNING, M. D.; DAWSON, M.; YOUNG, P.; JARNYK, M.; HARMELEN, J. V. Gemini near-infrared integral field spectrograph (NIFS). In: IYE, M.; MOORWOOD, A. F. M. (Ed.). **Instrument design and performance for optical/infrared ground-based telescopes**. [S.l.: s.n.], 2003. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 4841), p. 1581–1591. [26](#)

MEYER, M. J.; ZWAAN, M. A.; WEBSTER, R. L.; STAVELEY-SMITH, L.; RYAN-WEBER, E.; DRINKWATER, M. J.; BARNES, D. G.; HOWLETT, M.; KILBORN, V. A.; STEVENS, J.; WAUGH, M.; PIERCE, M. J.; BHATHAL, R.; BLOK, W. J. G. de; DISNEY, M. J.; EKERS, R. D.; FREEMAN, K. C.; GARCIA, D. A.; GIBSON, B. K.; HARNETT, J.; HENNING, P. A.; JERJEN, H.; KESTEVEN, M. J.; KNEZEK, P. M.; KORIBALSKI, B. S.; MADER, S.; MARQUARDING, M.; MINCHIN, R. F.; O'BRIEN, J.; OOSTERLOO, T.; PRICE, R. M.; PUTMAN, M. E.; RYDER, S. D.; SADLER, E. M.; STEWART, I. M.; STOOTMAN, F.; WRIGHT, A. E. The HIPASS catalogue - I. data presentation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 350, n. 4, p. 1195–1209, jun. 2004. [45](#), [63](#)

MINGO, B.; HARDCASTLE, M. J.; CROSTON, J. H.; EVANS, D. A.; KHARB, P.; KRAFT, R. P.; LENC, E. Shocks, seyferts, and the supernova remnant connection: a chandra observation of the circinus galaxy. **Astrophysical Journal**, v. 758, n. 2, p. 95, out. 2012. [115](#)

MINGOZZI, M.; CRESCI, G.; VENTURI, G.; MARCONI, A.; MANNUCCI, F.; Perna, M.; BELFIORE, F.; CARNIANI, S.; BALMAVERDE, B.; BRUSA, M.; CICONE, C.; FERUGLIO, C.; GALLAZZI, A.; MAINIERI, V.; MAIOLINO, R.; NAGAO, T.; NARDINI, E.; SANI, E.; TOZZI, P.; ZIBETTI, S. The MAGNUM survey: different gas properties in the outflowing and disc components in nearby active galaxies with MUSE. **Astronomy and Astrophysics**, v. 622, p. A146, fev. 2019. [17](#), [47](#), [69](#), [71](#)

MOORWOOD, A. F. M.; LUTZ, D.; OLIVA, E.; MARCONI, A.; NETZER, H.; GENZEL, R.; STURM, E.; GRAAUW, T. de. 2.5-45 $\mu$ m SWS spectroscopy of the Circinus Galaxy. **Astronomy and Astrophysics**, v. 315, p. L109–L112, nov. 1996. [31](#), [73](#)

- MORGANTI, R.; HOLT, J.; SARIPALLI, L.; OOSTERLOO, T. A.; TADHUNTER, C. N. IC 5063: AGN driven outflow of warm and cold gas. **Astronomy and Astrophysics**, v. 476, n. 2, p. 735–743, dez. 2007. [31](#)
- MORGANTI, R.; OOSTERLOO, T.; OONK, J. B. R.; FRIESWIJK, W.; TADHUNTER, C. The fast molecular outflow in the Seyfert galaxy IC 5063 as seen by ALMA. **Astronomy and Astrophysics**, v. 580, p. A1, ago. 2015. [149](#)
- MORGANTI, R.; OOSTERLOO, T.; TSVETANOV, Z. A Radio Study of the Seyfert Galaxy IC 5063: Evidence for Fast Gas Outflow. **Astronomical Journal**, v. 115, p. 915–927, mar. 1998. [31](#), [32](#)
- MORRIS, S.; WARD, M.; WHITTLE, M.; WILSON, A. S.; TAYLOR, K. The velocity fields and radio structures of the active galaxies NGC 5643 and NGC 7582. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 216, p. 193–217, set. 1985. [32](#)
- MÜLLER-SÁNCHEZ, F.; PRIETO, M. A.; HICKS, E. K. S.; VIVES-ARIAS, H.; DAVIES, R. I.; MALKAN, M.; TACCONI, L. J.; GENZEL, R. Outflows from active galactic nuclei: kinematics of the narrow-line and coronal-line regions in seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 739, p. 69, out. 2011. [53](#), [106](#)
- MURAYAMA, T.; TANIGUCHI, Y. Where Is the coronal line region in active galactic nuclei? **Astrophysical Journal, Letters**, v. 497, n. 1, p. L9–L12, abr. 1998. [105](#), [106](#)
- NENKOVA, M.; SIROCKY, M. M.; IVEZIĆ, Ž.; ELITZUR, M. AGN dusty tori. I. handling of clumpy media. **Astrophysical Journal**, v. 685, n. 1, p. 147–159, set. 2008. [34](#)
- NENKOVA, M.; SIROCKY, M. M.; NIKUTTA, R.; IVEZIĆ, Ž.; ELITZUR, M. AGN dusty tori. II. observational implications of clumpiness. **Astrophysical Journal**, v. 685, n. 1, p. 160–180, set. 2008. [34](#)
- NETZER, H. **The physics and evolution of active galactic nuclei**. [S.l.: s.n.], 2013. [2](#), [4](#), [6](#)
- \_\_\_\_\_. Revisiting the unified model of active galactic nuclei. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 53, p. 365–408, ago. 2015. [1](#), [2](#)
- NICASTRO, F.; MARTOCCHIA, A.; MATT, G. The lack of broad-line regions in low accretion rate active galactic nuclei as evidence of their origin in the accretion disk. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 589, p. L13–L16, maio 2003. [31](#)

OLIVA, E.; MARCONI, A.; MOORWOOD, A. F. M. Metal abundances and excitation of extranuclear clouds in the circinus galaxy. A new method for deriving abundances of AGN narrow line clouds. **Astronomy and Astrophysics**, v. 342, p. 87–100, fev. 1999. [31](#), [53](#), [54](#)

OLIVA, E.; SALVATI, M.; MOORWOOD, A. F. M.; MARCONI, A. Size and physical conditions of the coronal line region in a nearby seyfert 2: the circinus galaxy. **Astronomy and Astrophysics**, v. 288, p. 457–465, ago. 1994. [41](#), [53](#)

OOSTERLOO, T.; OONK, J. B. R.; MORGANTI, R.; COMBES, F.; DASYRA, K.; SALOMÉ, P.; VLAHAKIS, N.; TADHUNTER, C. Properties of the molecular gas in the fast outflow in the Seyfert galaxy IC 5063. **Astronomy and Astrophysics**, v. 608, p. A38, dez. 2017. [32](#), [148](#)

OSTERBROCK, D. E. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**. [S.l.: s.n.], 1989. [8](#), [60](#), [61](#), [74](#), [142](#)

OSTERBROCK, D. E.; FERLAND, G. J. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**. [S.l.: s.n.], 2006. [60](#), [72](#), [73](#)

PADOVANI, P. On the two main classes of active galactic nuclei. **Nature Astronomy**, v. 1, p. 0194, ago. 2017. [6](#)

PADOVANI, P.; ALEXANDER, D. M.; ASSEF, R. J.; De Marco, B.; GIOMMI, P.; HICKOX, R. C.; RICHARDS, G. T.; SMOLČIĆ, V.; HATZIMINAOGLOU, E.; MAINIERI, V.; SALVATO, M. Active galactic nuclei: what's in a name? **Astronomy and Astrophysics Reviews**, v. 25, n. 1, p. 2, ago. 2017. [2](#), [4](#)

PANDA, S. Explaining the Broad-line Region through photoionisation modelling. In: MAEK, K.; POLIŃSKA, M.; MAJCYNA, A.; STACHOWSKI, G.; POLESKI, R.; WYRZYKOWSKI, .; ÓŻAŃSKA, A. (Ed.). **XXXIX Polish Astronomical Society Meeting**. [S.l.: s.n.], 2020. v. 10, p. 261–266. [2](#)

PETERSON, B. M. **An introduction to active galactic nuclei**. [S.l.: s.n.], 1997. [1](#), [2](#), [4](#), [8](#)

\_\_\_\_\_. Measuring the masses of supermassive black holes. **Space Science Reviews**, v. 183, p. 253–275, set. 2014. [11](#)

PIER, E. A.; ANTONUCCI, R.; HURT, T.; KRISS, G.; KROLIK, J. The Intrinsic Nuclear Spectrum of NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 428, p. 124, jun. 1994. [34](#)

PRIETO, M. A.; MARCO, O.; GALLIMORE, J. Morphology of the coronal-line region in active galactic nuclei\*. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 364, n. 1, p. L28–L32, nov. 2005. 31, 53, 105

PROXAUF, B.; ÖTTL, S.; KIMESWENGER, S. Upgrading electron temperature and electron density diagnostic diagrams of forbidden line emission. **Astronomy and Astrophysics**, v. 561, p. A10, jan. 2014. 61, 142

RAWLINGS, S.; SAUNDERS, R. Evidence for a common central-engine mechanism in all extragalactic radio sources. **Nature**, v. 349, n. 6305, p. 138–140, jan. 1991. 6

REVALSKI, M.; MEENA, B.; MARTINEZ, F.; POLACK, G. E.; CRENSHAW, D. M.; KRAEMER, S. B.; COLLINS, N. R.; FISCHER, T. C.; SCHMITT, H. R.; SCHMIDT, J.; MAKSYM, W. P.; RAFELSKI, M. 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. **arXiv e-prints**, p. arXiv:2101.06270, jan. 2021. 34

RICHARD, J.; BACON, R.; VERNET, J. **MUSE user manual**. 2018. Disponível em: <[https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/muse/doc/ESO-261650\\_MUSE\\_User\\_Manual\\_8p12.pdf](https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/muse/doc/ESO-261650_MUSE_User_Manual_8p12.pdf)>. 27, 28, 29

RICO-VILLAS, F.; MARTÍN-PINTADO, J.; GONZÁLEZ-ALFONSO, E.; RIVILLA, V. M.; MARTÍN, S.; GARCÍA-BURILLO, S.; JIMÉNEZ-SERRA, I.; SÁNCHEZ-GARCÍA, M. Vibrationally excited hc<sub>3</sub>n emission in ngc1068: tracing the recent star formation in the starburst ring. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 502, n. 2, p. 3021–3034, Jan 2021. ISSN 1365-2966. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stab197>>. 116, 141

RIFFEL, R.; PASTORIZA, M. G.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; BONATTO, C. Probing the near-infrared stellar population of seyfert galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 400, n. 1, p. 273–290, nov. 2009. 42

RIFFEL, R.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; BROTHERTON, M. S.; PELETIER, R.; VAZDEKIS, A.; RIFFEL, R. A.; MARTINS, L. P.; BONATTO, C.; DAMETTO, N. Z.; DAHMER-HAHN, L. G.; RUNNOE, J.; PASTORIZA, M. G.; CHIES-SANTOS, A. L.; TREVISAN, M. Optical/NIR stellar absorption and emission-line indices from luminous infrared galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 486, n. 3, p. 3228–3247, jul. 2019. 1, 17

- RIFFEL, R. A.; HEKATELYNE, C.; FREITAS, I. C. Outflows in the Seyfert 2 galaxy NGC 5643 traced by the [S III] emission. **Publications of the Astronomical Society of Australia**, v. 35, p. 40, nov. 2018. [17](#), [32](#), [148](#)
- RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; RIFFEL, R.; DAHMER-HAHN, L. G.; DINIZ, M. R.; SCHÖNELL, A. J.; DAMETTO, N. Z. Gemini NIFS survey of feeding and feedback processes in nearby active galaxies - I. stellar kinematics. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 470, n. 1, p. 992–1016, set. 2017. [17](#), [19](#)
- RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; WINGE, C.; MCGREGOR, P. J.; BECK, T.; SCHMITT, H. Mapping of molecular gas inflow towards the Seyfert nucleus of NGC4051 using Gemini NIFS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 385, n. 3, p. 1129–1142, abr. 2008. [18](#)
- RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; ZAKAMSKA, N. L.; RIFFEL, R. Ionized and hot molecular outflows in the inner 500 pc of NGC 1275. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 496, n. 4, p. 4857–4873, jul. 2020. [15](#)
- ROBERTIS, M. M. D.; OSTERBROCK, D. E. An analysis of the narrow-line profiles in high ionization Seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 286, p. 171–185, nov. 1984. [105](#)
- RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; CONTINI, M.; VIEGAS, S. M. The continuum and narrow-line region of the narrow-line Seyfert 1 galaxy Mrk 766. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 357, p. 220–234, fev. 2005. [47](#), [48](#)
- RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; FONSECA-FARIA, M. A. A 700 pc extended coronal gas emission in the circinus galaxy. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 895, n. 1, p. L9, maio 2020. [15](#), [60](#), [107](#), [120](#)
- RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; MASON, R. E.; MARTINS, L.; ALMEIDA, C. R.; RIFFEL, R. A.; RIFFEL, R.; LIRA, P.; MARTÍN, O. G.; DAMETTO, N. Z.; FLOHIC, H.; HO, L. C.; RUSCHEL-DUTRA, D.; THANJAVUR, K.; COLINA, L.; MCDERMID, R. M.; PERLMAN, E.; WINGE, C. The complex, dusty narrow-line region of NGC 4388: gas-jet interactions, outflows and extinction revealed by near-IR spectroscopy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 465, p. 906–925, fev. 2017. [13](#)

RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; PASTORIZA, M. G.; MAZA, J. Spectroscopy of the nuclear emission-line regions of the two newly detected seyfert 1 galaxies F10.01 and A08.12. **Astrophysical Journal**, v. 494, n. 1, p. 202–210, fev. 1998. 17

RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; PRIETO, M. A.; PORTILLA, J. G.; TEJEIRO, J. M. The near-infrared coronal line spectrum of 54 nearby active galactic nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 743, p. 100, dez. 2011. 33

RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; PRIETO, M. A.; VIEGAS, S.; GRUENWALD, R. Outflows of very ionized gas in the centers of seyfert galaxies: kinematics and physical conditions. **Astrophysical Journal**, v. 653, p. 1098–1114, dez. 2006. 15, 31, 34, 53, 69, 105, 112

ROSE, M.; TADHUNTER, C.; ALMEIDA, C. R.; ZAURÍN, J. R.; SANTORO, F.; SPENCE, R. Quantifying the AGN-driven outflows in ULIRGs (QUADROS) - I: VLT/Xshooter observations of nine nearby objects. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 474, n. 1, p. 128–156, fev. 2018. 54, 72

SÁNCHEZ, F. M.; DAVIES, R. I.; EISENHAUER, F.; TACCONI, L. J.; GENZEL, R.; STERNBERG, A. SINFONI adaptive optics integral field spectroscopy of the Circinus Galaxy. **Astronomy and Astrophysics**, v. 454, p. 481–492, ago. 2006. 31, 53

SÁNCHEZ, S. F.; KENNICUTT, R. C.; PAZ, A. Gil de; VEN, G. van de; VÍLCHEZ, J. M.; WISOTZKI, L.; WALCHER, C. J.; MAST, D.; AGUERRI, J. A. L.; ALBIOL-PÉREZ, S.; ALONSO-HERRERO, A.; ALVES, J.; BAKOS, J.; BARTÁKOVÁ, T.; BLAND-HAWTHORN, J.; BOSELLI, A.; BOMANS, D. J.; CASTILLO-MORALES, A.; CORTIJO-FERRERO, C.; LORENZO-CÁCERES, A. de; OLMO, A. D.; DETTMAR, R. J.; DÍAZ, A.; ELLIS, S.; FALCÓN-BARROSO, J.; FLORES, H.; GALLAZZI, A.; GARCÍA-LORENZO, B.; DELGADO, R. G.; GRUEL, N.; HAINES, T.; HAO, C.; HUSEMANN, B.; IGLÉSIAS-PÁRAMO, J.; JAHNKE, K.; JOHNSON, B.; JUNGWIERT, B.; KALINOVA, V.; KEHRIG, C.; KUPKO, D.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, A. R.; LYUBENOVA, M.; MARINO, R. A.; MÁRMOL-QUERALTÓ, E.; MÁRQUEZ, I.; MASEGOSA, J.; MEIDT, S.; MENDEZ-ABREU, J.; MONREAL-IBERO, A.; MONTIJO, C.; MOURÃO, A. M.; PALACIOS-NAVARRO, G.; PAPADEROS, P.; PASQUALI, A.; PELETIER, R.; PÉREZ, E.; PÉREZ, I.; QUIRRENBACH, A.; RELAÑO, M.; ROSALES-ORTEGA, F. F.; ROTH, M. M.; RUIZ-LARA, T.; SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P.; SENGUPTA, C.; SINGH, R.; STANISHEV, V.; TRAGER, S. C.; VAZDEKIS, A.; VIIRONEN, K.; WILD, V.; ZIBETTI, S.;

ZIEGLER, B. CALIFA, the calar alto legacy integral field area survey. I. survey presentation. **Astronomy and Astrophysics**, v. 538, p. A8, fev. 2012. 18

SANTORO, F.; ROSE, M.; MORGANTI, R.; TADHUNTER, C.; OOSTERLOO, T. A.; HOLT, J. Probing multi-phase outflows and AGN feedback in compact radio galaxies: the case of PKS B1934-63. **Astronomy and Astrophysics**, v. 617, p. A139, out. 2018. 72, 146

SCHLAFLY, E. F.; FINKBEINER, D. P. Measuring reddening with sloan digital sky survey stellar spectra and recalibrating SFD. **Astrophysical Journal**, v. 737, n. 2, p. 103, ago. 2011. 40

SCHMITT, H. R.; STORCHI-BERGMANN, T.; BALDWIN, J. A. Anisotropic high-excitation emission and chemical abundances in the seyfert 2 galaxy NGC 5643. **Astrophysical Journal**, v. 423, p. 237, mar. 1994. 32

SCHÖNELL, A. J.; STORCHI-BERGMANN, T.; RIFFEL, R. A.; RIFFEL, R.; BIANCHIN, M.; DAHMER-HAHN, L. G.; DINIZ, M. R.; DAMETTO, N. Z. Gemini NIFS survey of feeding and feedback in nearby active galaxies - III. Ionized versus warm molecular gas masses and distributions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 485, n. 2, p. 2054–2070, maio 2019. 18

SCHULZ, R.; MORGANTI, R.; NYLAND, K.; PARAGI, Z.; MAHONY, E. K.; OOSTERLOO, T. Mapping the neutral atomic hydrogen gas outflow in the restarted radio galaxy 3C 236. **Astronomy and Astrophysics**, v. 617, p. A38, set. 2018. 16

SHIMIZU, T. T.; DAVIES, R. I.; LUTZ, D.; BURTSCHER, L.; LIN, M.; BARON, D.; DAVIES, R. L.; GENZEL, R.; HICKS, E. K. S.; KOSS, M.; MACIEJEWSKI, W.; MÜLLER-SÁNCHEZ, F.; XIVRY, G. Orban de; PRICE, S. H.; RICCI, C.; RIFFEL, R.; RIFFEL, R. A.; ROSARIO, D.; SCHARTMANN, M.; SCHNORR-MÜLLER, A.; STERNBERG, A.; STURM, E.; STORCHI-BERGMANN, T.; TACCONI, L.; VEILLEUX, S. The multiphase gas structure and kinematics in the circumnuclear region of NGC 5728. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 490, n. 4, p. 5860–5887, dez. 2019. 18, 33, 148

SHIN, J.; WOO, J.-H.; KIM, M.; WANG, J. Revisiting the complex kinematics of ionized gas at the central region of NGC 1068: evidence of an additional active galactic nucleus? **Astrophysical Journal**, v. 908, n. 1, p. 81, fev. 2021. 106, 107, 148

SIMPSON, C.; WILSON, A. S.; BOWER, G.; HECKMAN, T. M.; KROLIK, J. H.; MILEY, G. K. A One-sided ionization cone in the seyfert 2 galaxy NGC 5643. **Astrophysical Journal**, v. 474, n. 1, p. 121–128, jan. 1997. 32

SOLÓRZANO-IÑARREA, C.; TADHUNTER, C. N. INTEGRAL spectroscopy of three powerful radio galaxies: jet-cloud interactions seen in three dimensions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 340, n. 3, p. 705–721, abr. 2003. 73

SON, D. H.; HYUNG, S.; FERRUIT, P.; PÉCONTAL, E.; Lee, W. B. The kinematics of the Seyfert 2 galaxy NGC5728 circumnuclear region. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 395, n. 2, p. 692–718, maio 2009. 33

SRIDHAR, S. S.; MORGANTI, R.; NYLAND, K.; FRANK, B. S.; HARWOOD, J.; OOSTERLOO, T. LOFAR view of NGC 3998, a sputtering AGN. **Astronomy and Astrophysics**, v. 634, p. A108, fev. 2020. 13

STASIŃSKA, G.; ASARI, N. V.; FERNANDES, R. C.; GOMES, J. M.; SCHLICKMANN, M.; MATEUS, A.; SCHOENELL, W.; SODRÉ, L. Can retired galaxies mimic active galaxies? clues from the sloan digital sky survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 391, n. 1, p. L29–L33, nov. 2008. 7

STORCHI-BERGMANN, T. Feeding and feedback in nearby AGN from integral field spectroscopy. In: HEINZ, S.; WILCOTS, E. (Ed.). **The monster's fiery breath: feedback in galaxies, groups, and clusters**. [S.l.: s.n.], 2009. (American Institute of Physics Conference Series, v. 1201), p. 88–91. 15, 18

\_\_\_\_\_. Feeding and feedback in nearby AGN - comparison with the Milky Way center. In: SJOUWERMAN, L. O.; LANG, C. C.; OTT, J. (Ed.). **The galactic center: feeding and feedback in a normal galactic nucleus**. [S.l.: s.n.], 2014. v. 303, p. 354–363. 12

\_\_\_\_\_. The co-evolution of galaxies and supermassive black holes in the near Universe. **arXiv e-prints**, p. arXiv:1403.5816, mar. 2014. 18

\_\_\_\_\_. Active Galactic Nuclei in 3D: feeding and feedback processes. In: **IAU GENERAL ASSEMBLY**. [S.l.: s.n.], 2015. v. 29, p. 2286157. 15

STORCHI-BERGMANN, T.; SCHNORR-MÜLLER, A. Observational constraints on the feeding of supermassive black holes. **Nature Astronomy**, v. 3, p. 48–61, jan. 2019. 13

STORCHI-BERGMANN, T.; WINGE, C.; WARD, M. J.; WILSON, A. S. Extended gas in Seyfert galaxies: near-infrared observations of NGC 2110 and Circinus. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 304, p. 35–46, mar. 1999. 17, 31, 53

STURM, E.; DEXTER, J.; PFUHL, O.; STOCK, M. R.; DAVIES, R. I.; LUTZ, D.; CLÉNET, Y.; ECKART, A.; EISENHAUER, F.; GENZEL, R.; GRATADOUR, D.; HÖNIG, S. F.; KISHIMOTO, M.; LACOUR, S.; MILLOUR, F.; NETZER, H.; PERRIN, G.; PETERSON, B. M.; PETRUCCI, P. O.; ROUAN, D.; WAISBERG, I.; WOILLEZ, J.; AMORIM, A.; BRANDNER, W.; SCHREIBER, N. M. F.; GARCIA, P. J. V.; GILLESSEN, S.; OTT, T.; PAUMARD, T.; PERRAUT, K.; SCHEITHAUER, S.; STRAUBMEIER, C.; TACCONI, L. J.; WIDMANN, F. Spatially resolved rotation of the broad-line region of a quasar at sub-parsec scale. **Nature**, v. 563, n. 7733, p. 657–660, nov. 2018. 4

TADHUNTER, C.; MORGANTI, R.; ROSE, M.; Oonk, J. B. R.; OOSTERLOO, T. Jet acceleration of the fast molecular outflows in the Seyfert galaxy IC 5063. **Nature**, v. 511, p. 440–443, jul. 2014. 32

TADHUNTER, C. N.; FOSBURY, R. A. E.; ALIGHIERI, S. di S.; BLAND, J.; DANZIGER, I. J.; GOSS, W. M.; MCADAM, W. B.; SNIJDERS, M. A. J. Very extended ionized gas in radio galaxies - IV. PKS 2152-69. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 235, p. 403–423, nov. 1988. 105

TADHUNTER, C. N.; FOSBURY, R. A. E.; BINETTE, L.; DANZIGER, I. J.; ROBINSON, A. Detached nuclear-like activity in the radio galaxy PKS 2152-69. **Nature**, v. 325, n. 6104, p. 504–507, fev. 1987. 105

TRISTRAM, K. R. W.; MEISENHEIMER, K.; JAFFE, W.; SCHATTMANN, M.; RIX, H. W.; LEINERT, C.; MOREL, S.; WITTKOWSKI, M.; RÖTTGERING, H.; PERRIN, G.; LOPEZ, B.; RABAN, D.; COTTON, W. D.; GRASER, U.; PARESCE, F.; HENNING, T. Resolving the complex structure of the dust torus in the active nucleus of the Circinus galaxy. **Astronomy and Astrophysics**, v. 474, n. 3, p. 837–850, nov. 2007. 31

TULLY, R. B.; COURTOIS, H. M.; SORCE, J. G. Cosmicflows-3. **Astronomical Journal**, v. 152, p. 50, ago. 2016. 33

URRY, C. M.; PADOVANI, P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 107, p. 803, set. 1995. 8, 9

VAUCOULEURS, G. de; VAUCOULEURS, A. de; CORWIN JR., H. G.; BUTA, R. J.; PATUREL, G.; FOUQUÉ, P. **Third reference catalogue of bright galaxies**. [S.l.: s.n.], 1991. 33

VAZDEKIS, A.; KOLEVA, M.; RICCIARDELLI, E.; RÖCK, B.; FALCÓN-BARROSO, J. UV-extended E-MILES stellar population models: young components in massive early-type galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 463, n. 4, p. 3409–3436, dez. 2016. 41

VEILLEUX, S.; BLAND-HAWTHORN, J. Artillery shells over circinus. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 479, n. 2, p. L105–L108, abr. 1997. 66

VEILLEUX, S.; OSTERBROCK, D. E. Spectral classification of emission-line galaxies. **Astrophysical Journal, Supplement**, v. 63, p. 295, fev. 1987. 114

VENEMANS, B. P.; WALTER, F.; DECARLI, R.; BAÑADOS, E.; CARILLI, C.; WINTERS, J. M.; SCHUSTER, K.; CUNHA, E. da; FAN, X.; FARINA, E. P.; MAZZUCHELLI, C.; RIX, H.-W.; WEISS, A. Copious amounts of dust and gas in a  $z = 7.5$  quasar host galaxy. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 851, p. L8, dez. 2017. 6

VENTURI, G.; CRESCI, G.; MARCONI, A.; MINGOZZI, M.; NARDINI, E.; CARNIANI, S.; MANNUCCI, F.; MARASCO, A.; MAIOLINO, R.; PERNA, M.; TREISTER, E.; BLAND-HAWTHORN, J.; GALLIMORE, J. MAGNUM survey: compact jets causing large turmoil in galaxies. Enhanced line widths perpendicular to radio jets as tracers of jet-ISM interaction. **Astronomy and Astrophysics**, v. 648, p. A17, abr. 2021. 26, 114, 141

WADA, K.; YONEKURA, K.; NAGAO, T. Circumnuclear multiphase gas in circinus galaxy. III. structure of the nuclear ionized gas. **Astrophysical Journal**, v. 867, p. 49, nov. 2018. 15

WANG, J.; FABBIANO, G.; KAROVSKA, M.; ELVIS, M.; RISALITI, G. The Chandra HRC view of the subarcsecond structures in the nuclear region of NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 756, n. 2, p. 180, set. 2012. 120

- WEHINGER, P. A.; WYCKOFF, S. Seyfert galaxies with large  $Z$  - an electronographic survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 181, p. 211–231, out. 1977. 4, 5
- WEILBACHER, P. M.; PALSA, R.; STREICHER, O.; BACON, R.; URRUTIA, T.; WISOTZKI, L.; CONSEIL, S.; HUSEMANN, B.; JARNO, A.; KELZ, A.; PÉCONTAL-ROUSSET, A.; RICHARD, J.; ROTH, M. M.; SELMAN, F.; VERNET, J. The data processing pipeline for the MUSE instrument. **Astronomy and Astrophysics**, v. 641, p. A28, set. 2020. 29
- WYLEZALEK, D.; MORGANTI, R. Questions and challenges of what powers galactic outflows in active galactic nuclei. **Nature Astronomy**, v. 2, p. 181–182, fev. 2018. 13, 20
- YOUNG, A. J.; WILSON, A. S.; SHOPBELL, P. L. A Chandra X-ray study of NGC 1068. I. observations of extended emission. **Astrophysical Journal**, v. 556, n. 1, p. 6–23, jul. 2001. 120
- ZAKAMSKA, N. L.; HAMANN, F.; PÂRIS, I.; BRANDT, W. N.; GREENE, J. E.; STRAUSS, M. A.; VILLFORTH, C.; WYLEZALEK, D.; ALEXANDROFF, R. M.; ROSS, N. P. Discovery of extreme [O III]  $\lambda 5007$  Å outflows in high-redshift red quasars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 459, p. 3144–3160, jul. 2016. 6, 53

## ANEXO A - RESULTADOS DO SUMA PARA CADA REGIÃO

Tabela A.1 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R1a ( $\Delta X/\Delta Y : 8''\text{-}12''/10''\text{-}14''$ ).

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	227,09	283,11	487,05
HeII $\lambda$ 5412	201,78	205,36	607,22
[Ar X] $\lambda$ 5533	284,48	284,48	559,74
[Fe VII] $\lambda$ 6087	196,50	237,36	541,28
[O I] $\lambda$ 6300	185,51	239,16	522,33
[S III] $\lambda$ 6312	176,84	185,48	405,93
[O I] $\lambda$ 6364	204,99	204,99	517,25
[Fe X] $\lambda$ 6375	272,87	272,87	530,82
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	201,95	274,45	502,65
[N II] $\lambda$ 6583	175,23	229,31	466,03
HeI $\lambda$ 6678	250,34	263,44	494,12
[S II] $\lambda$ 6716	196,58	268,94	419,48
[Ar V] $\lambda$ 7006	173,00	202,94	432,77
[Ar III] $\lambda$ 7136	181,78	248,67	400,67
[O II] $\lambda$ 7320	216,15	251,08	647,57
[S III] $\lambda$ 9069	160,61	182,38	354,02

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.2 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R1b  $\Delta X/\Delta Y : 12''\text{-}15''/14''\text{-}17''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	238,07	298,36	654,85
HeII $\lambda$ 5412	160,34	160,34	170,82
[Ar X] $\lambda$ 5533	208,82	208,82	425,95
[Fe VII] $\lambda$ 6087	208,44	237,79	429,15
[O I] $\lambda$ 6300	161,98	165,97	380,53
[S III] $\lambda$ 6312	143,07	143,07	170,48
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	235,34	235,34	530,82
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	206,53	275,76	502,65
[N II] $\lambda$ 6583	184,74	207,37	434,19
HeI $\lambda$ 6678	164,22	164,22	212,97
[S II] $\lambda$ 6716	203,46	273,07	491,36
[Ar V] $\lambda$ 7006	175,96	185,29	383,71
[Ar III] $\lambda$ 7136	177,54	200,93	462,73
[O II] $\lambda$ 7320	104,33	104,33	116,20
[S III] $\lambda$ 9069	216,16	216,16	298,11

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.3 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R2a  $\Delta X/\Delta Y : 18''\text{-}20''/14''\text{-}16''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	211,04	247,87	542,23
HeII $\lambda$ 5412	-	-	-
[Ar X] $\lambda$ 5533	210,92	210,92	317,83
[Fe VII] $\lambda$ 6087	164,46	164,46	232,47
[O I] $\lambda$ 6300	124,02	124,02	124,02
[S III] $\lambda$ 6312	-	-	-
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	199,80	199,80	272,80
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	197,09	257,99	502,65
[N II] $\lambda$ 6583	193,77	203,19	299,39
HeI $\lambda$ 6678	-	-	-
[S II] $\lambda$ 6716	179,84	199,06	309,16
[Ar V] $\lambda$ 7006	159,28	159,28	221,86
[Ar III] $\lambda$ 7136	172,76	175,44	330,17
[O II] $\lambda$ 7320	-	-	-
[S III] $\lambda$ 9069	118,10	118,10	161,98

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.4 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R2b  $\Delta X/\Delta Y : 17''\text{-}19''/17''\text{-}19''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	231,31	276,70	414,29
HeII $\lambda$ 5412	-	-	-
[Ar X] $\lambda$ 5533	419,93	419,93	419,93
[Fe VII] $\lambda$ 6087	-	-	-
[O I] $\lambda$ 6300	130,53	130,53	169,56
[S III] $\lambda$ 6312	-	-	-
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	317,62	317,62	431,50
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	212,09	302,18	502,65
[N II] $\lambda$ 6583	145,83	145,83	172,41
HeI $\lambda$ 6678	-	-	-
[S II] $\lambda$ 6716	139,08	145,08	222,67
[Ar V] $\lambda$ 7006	-	-	-
[Ar III] $\lambda$ 7136	117,63	117,63	147,07
[O II] $\lambda$ 7320	103,63	103,63	103,63
[S III] $\lambda$ 9069	-	-	-

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.5 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R3  $\Delta X/\Delta Y : 20''\text{-}25''/16''\text{-}19''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	242,93	311,40	654,85
HeII $\lambda$ 5412	-	-	-
[Ar X] $\lambda$ 5533	165,09	165,09	239,91
[Fe VII] $\lambda$ 6087	217,67	217,67	541,28
[O I] $\lambda$ 6300	137,28	137,28	254,49
[S III] $\lambda$ 6312	-	-	-
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	167,85	167,85	247,35
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	223,04	315,90	502,65
[N II] $\lambda$ 6583	159,52	161,39	287,12
HeI $\lambda$ 6678	-	-	-
[S II] $\lambda$ 6716	153,09	164,37	431,63
[Ar V] $\lambda$ 7006	137,14	137,14	203,06
[Ar III] $\lambda$ 7136	150,73	155,35	305,29
[O II] $\lambda$ 7320	109,65	109,65	164,40
[S III] $\lambda$ 9069	175,48	175,48	256,08

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.6 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R4  $\Delta X/\Delta Y : 4''\text{-}7''/8''\text{-}11''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	194,89	217,95	317,95
HeII $\lambda$ 5412	213,49	213,49	325,61
[Ar X] $\lambda$ 5533	236,47	236,47	344,75
[Fe VII] $\lambda$ 6087	224,46	237,48	541,28
[O I] $\lambda$ 6300	170,21	214,54	355,62
[S III] $\lambda$ 6312	198,70	198,70	426,15
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	204,29	204,29	437,36
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	169,76	221,52	306,84
[N II] $\lambda$ 6583	167,60	217,07	307,90
HeI $\lambda$ 6678	160,63	186,11	470,34
[S II] $\lambda$ 6716	143,90	173,15	241,78
[Ar V] $\lambda$ 7006	185,58	188,31	314,73
[Ar III] $\lambda$ 7136	146,03	184,46	282,23
[O II] $\lambda$ 7320	270,55	336,79	647,57
[S III] $\lambda$ 9069	125,74	140,00	184,42

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.7 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R5a  $\Delta X/\Delta Y : 11''\text{-}14''/5''\text{-}7''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	246,70	322,52	458,39
HeII $\lambda$ 5412	194,59	194,59	285,53
[Ar X] $\lambda$ 5533	157,38	157,38	174,62
[Fe VII] $\lambda$ 6087	196,67	201,44	295,66
[O I] $\lambda$ 6300	197,52	262,98	486,07
[S III] $\lambda$ 6312	139,75	144,02	209,41
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	210,16	210,16	381,42
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	226,96	317,83	489,60
[N II] $\lambda$ 6583	213,06	293,41	482,82
HeI $\lambda$ 6678	187,75	187,75	352,43
[S II] $\lambda$ 6716	195,42	256,15	368,11
[Ar V] $\lambda$ 7006	201,52	201,52	401,66
[Ar III] $\lambda$ 7136	151,77	168,39	458,91
[O II] $\lambda$ 7320	222,81	247,85	647,57
[S III] $\lambda$ 9069	134,21	140,29	207,92

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.8 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R5b  $\Delta X/\Delta Y : 15''\text{-}19''/5''\text{-}8''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	241,61	310,98	654,85
HeII $\lambda$ 5412	185,20	185,20	488,50
[Ar X] $\lambda$ 5533	292,35	292,35	447,36
[Fe VII] $\lambda$ 6087	177,53	179,65	325,64
[O I] $\lambda$ 6300	204,50	268,16	522,33
[S III] $\lambda$ 6312	165,16	173,30	522,33
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	256,48	256,48	530,82
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	238,23	332,96	502,65
[N II] $\lambda$ 6583	224,92	311,84	502,65
HeI $\lambda$ 6678	207,98	207,98	426,86
[S II] $\lambda$ 6716	193,17	255,07	491,36
[Ar V] $\lambda$ 7006	155,43	159,66	387,87
[Ar III] $\lambda$ 7136	172,32	203,44	462,73
[O II] $\lambda$ 7320	164,27	179,51	647,57
[S III] $\lambda$ 9069	161,72	185,80	363,64

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.9 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R6a  $\Delta X/\Delta Y : 0''\text{-}1''/0''\text{-}1''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	266,54	362,76	393,56
HeII $\lambda$ 5412	165,43	165,43	203,56
[Ar X] $\lambda$ 5533	187,49	187,49	194,74
[Fe VII] $\lambda$ 6087	261,17	391,28	416,86
[O I] $\lambda$ 6300	195,78	267,54	300,10
[S III] $\lambda$ 6312	124,02	124,02	124,02
[O I] $\lambda$ 6364	162,66	201,91	222,50
[Fe X] $\lambda$ 6375	196,16	196,16	201,39
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	236,59	350,79	367,16
[N II] $\lambda$ 6583	210,90	301,26	312,09
HeI $\lambda$ 6678	282,17	448,87	494,12
[S II] $\lambda$ 6716	207,79	295,13	307,59
[Ar V] $\lambda$ 7006	172,40	202,81	232,23
[Ar III] $\lambda$ 7136	219,19	326,07	361,89
[O II] $\lambda$ 7320	146,09	153,17	184,16
[S III] $\lambda$ 9069	164,44	238,50	243,81

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.10 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R6b  $\Delta X/\Delta Y : 3''\text{-}4''/4''\text{-}5''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	264,12	357,91	383,07
HeII $\lambda$ 5412	-	-	-
[Ar X] $\lambda$ 5533	579,34	579,34	579,34
[Fe VII] $\lambda$ 6087	200,24	200,24	206,85
[O I] $\lambda$ 6300	147,08	170,14	247,64
[S III] $\lambda$ 6312	-	-	-
[O I] $\lambda$ 6364	122,44	122,44	122,44
[Fe X] $\lambda$ 6375	243,09	243,09	459,43
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	193,78	269,57	307,16
[N II] $\lambda$ 6583	187,13	250,60	348,42
HeI $\lambda$ 6678	-	-	-
[S II] $\lambda$ 6716	195,90	273,22	335,07
[Ar V] $\lambda$ 7006	-	-	-
[Ar III] $\lambda$ 7136	196,58	285,60	462,73
[O II] $\lambda$ 7320	245,82	348,97	459,17
[S III] $\lambda$ 9069	208,45	208,45	226,24

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.11 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R7  $\Delta X/\Delta Y : 0''\text{-}5''/15''\text{-}20''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	249,75	327,65	654,85
HeII $\lambda$ 5412	-	-	-
[Ar X] $\lambda$ 5533	267,58	267,58	505,81
[Fe VII] $\lambda$ 6087	-	-	-
[O I] $\lambda$ 6300	131,75	132,91	219,62
[S III] $\lambda$ 6312	-	-	-
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	269,31	269,31	530,82
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	204,41	280,92	502,65
[N II] $\lambda$ 6583	155,42	180,21	375,20
HeI $\lambda$ 6678	136,23	136,23	177,78
[S II] $\lambda$ 6716	152,87	184,34	491,36
[Ar V] $\lambda$ 7006	-	-	-
[Ar III] $\lambda$ 7136	133,55	136,27	462,73
[O II] $\lambda$ 7320	114,38	114,38	175,10
[S III] $\lambda$ 9069	104,90	104,90	176,47

<sup>1</sup> valor médio

Tabela A.12 - Valores de FWHM (em  $\text{km s}^{-1}$ ) medida na região R8  $\Delta X/\Delta Y : 15''\text{-}25''/0''\text{-}4''$ .

	FWHM <sup>1</sup>	max FWHM <sup>1</sup>	max FWHM
[O III] $\lambda$ 5007	254,62	323,29	654,85
HeII $\lambda$ 5412	-	-	-
[Ar X] $\lambda$ 5533	185,23	185,23	371,87
[Fe VII] $\lambda$ 6087	143,02	143,02	143,02
[O I] $\lambda$ 6300	168,02	177,55	380,05
[S III] $\lambda$ 6312	-	-	-
[O I] $\lambda$ 6364	-	-	-
[Fe X] $\lambda$ 6375	218,10	218,10	530,82
H $\alpha$ $\lambda$ 6563	223,30	294,64	502,65
[N II] $\lambda$ 6583	173,35	189,60	294,05
HeI $\lambda$ 6678	-	-	-
[S II] $\lambda$ 6716	178,47	211,43	491,36
[Ar V] $\lambda$ 7006	211,18	211,18	295,03
[Ar III] $\lambda$ 7136	161,44	163,10	323,07
[O II] $\lambda$ 7320	104,71	104,71	122,15
[S III] $\lambda$ 9069	91,48	91,48	126,39

<sup>1</sup> valor médio