



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.12.17.27-TDI

ORIGEM DAS LINHAS DE ALTA IONIZAÇÃO EM NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS

Yaherlyn Elimar Díaz Ramirez

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Astrofísica,
orientada pelo Dr. Alberto
Rodriguez Ardila, aprovada em 26
de fevereiro de 2018.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QH9P4L>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.12.17.27-TDI

ORIGEM DAS LINHAS DE ALTA IONIZAÇÃO EM NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS

Yaherlyn Elimar Díaz Ramirez

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Astrofísica,
orientada pelo Dr. Alberto
Rodriguez Ardila, aprovada em 26
de fevereiro de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QH9P4L>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Díaz Ramirez, Yaherlyn Elimar.

D543o Origem das linhas de alta ionização em núcleos ativos de galáxias / Yaherlyn Elimar Díaz Ramirez. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xxiv + 105 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.12.17.27-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientador : Dr. Alberto Rodriguez Ardila.

1. Núcleos galácticos ativos. 2. Linhas de alta ionização.
3. Linhas coronais. 4. Fotoionização. 5. Infravermelho: galáxias.
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/).

Aluno (a): **Yaherlyn Elimar Díaz Ramirez**

Título: "ORIGEM DAS LINHAS DE ALTA IONIZAÇÃO EM NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Astrofísica

Dra. Cláudia Vilega Rodrigues



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Video - Conferência

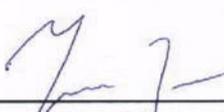
Dr. Alberto Rodriguez Ardila



Orientador(a) / LNA / Itajubá - MG

Participação por Video - Conferência

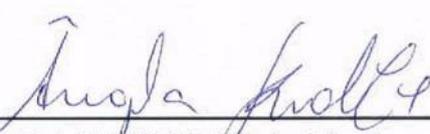
Dr. João Braga



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Dra. Angela Cristina Krabbe



Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 26 de fevereiro de 2018.

“¿Sabías que, antiguamente, la gente creía que si te dormías con la luz de la luna en la frente, despertabas loco? De ahí procede la palabra lunático”.

JOHN KATZENBACH
em “*La Historia del loco*”

*A meus pais,
um exemplo de que com dedicação tudo é possível...*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me deu coragem e força para começar uma nova vida numa terra completamente desconhecida e longe da minha família.

À minha mãe, pai e irmã pelo amor e suporte, pela paciência e ajuda que sempre prestaram para que eu realizasse meus sonhos ainda na distância.

Ao meu orientador, Alberto, pela oportunidade de trabalhar numa área tão fascinante. Pela sua orientação, paciência, por acreditar na minha capacidade e por me inspirar.

À Yasmin Matos Amado. É inegável que ela merece boa parte do crédito por meu sucesso. Por me apoiar, tanto nos momentos agradáveis quanto nos momentos adversos. Minha personalidade, hoje, tem um pouco dela.

Ao Luis Palacios, por todo o amor, compreensão e incentivo.

Ao meu grande amigo, Luis Mendoza, pela grande ajuda nas épocas difíceis, pela amizade e sempre ajudar a manter minha sanidade.

Ao Fernando, por manter legível minhas ideias.

À Aysses, Rafael, Tábata, Pietra e a todos os companheiros do curso, pela amizade e pela grande ajuda no mestrado. Todos vocês foram de grande importância para o desenvolvimento de meu trabalho e em me tornar a pessoa que sou hoje.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por me permitir fazer parte de sua história.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Núcleos ativos de galáxia (AGNs) apresentam em seus espectros linhas proibidas de alta ionização ou linhas coronais (CLs). Devido à energia necessária para sua produção (> 100 eV), as CLs traçam uma parte importante do contínuo ionizante que nem sempre é diretamente acessível a partir de observações devido à absorção Galáctica e interna. Sabe-se que as CLs são geralmente emitidas em regiões compactas próximas à fonte central, mas as condições físicas do gás e os mecanismos associados a sua produção ainda estão em debate. Neste trabalho analisamos os parsecs mais internos de uma amostra de 4 galáxias ativas próximas com emissão coronal proeminente para estudar os mecanismos físicos responsáveis pela produção das CLs. Com este intuito, observações de alta resolução angular ($\sim 0.1''/\text{px}$) coletadas com espectrógrafos de campo integral e óptica adaptativa permitem estudar a distribuição espacial do gás de alta ionização assim como modelar as razões $[\text{Si VI}]/\text{Br}\gamma$, $[\text{S IX}]/\text{Pa}\beta$, $[\text{Ca VIII}]/\text{Br}\gamma$ e $[\text{Si VII}]/\text{Br}\gamma$ usando o código de fotoionização CLOUDY. Encontramos que a emissão coronal nos objetos estudados é estendida, até distâncias da ordem de 150-200 pc. O gás distribui-se preferencialmente ao longo do jato rádio em cada uma das galáxias. A distribuição do gás é altamente inhomogênea, com múltiplos *knots* em emissão. Mapas de canais mostram que a emissão coronal é turbulenta, com velocidades de dispersão acima dos 900 km s^{-1} . Modelos de fotoionização realizados com CLOUDY comprovam que a fotoionização não é o único mecanismo físico responsável pela emissão das linhas coronais. Processos energéticos tais como choques são necessários para explicar a emissão do gás de alta ionização. De modo geral, o nosso trabalho demonstra a utilidade de observações IFUs de alta resolução angular para entender, de forma mais acurada, os processos físicos nos parsecs mais internos dos AGNs.

Palavras-chave: Núcleos Galáticos Ativos. Linhas de alta ionização. Linhas coronais. Fotoionização. Infravermelho: galaxias.

ORIGIN OF HIGH IONIZATION LINES IN ACTIVE GALACTIC NUCLEI

ABSTRACT

Active galactic nuclei (AGNs) present, in their spectra, lines of high ionization or coronal lines (CLs). Due to the potential necessary for its production (> 100 eV), the CLs trace a part of the ionizing continuum which is not always directly accessible from observations due to Galactic and internal absorption. It is known that CLs are generally emitted in compact regions near the central source, but the physical conditions of the gas and the mechanisms associated with their production are under discussion. In this work we analyze the most internal parsecs of a sample of 4 nearby active galaxies with prominent coronal emission to study the physical mechanisms responsible for the production of CLs. For this purpose, observations of high angular resolution ($\sim 0.1''/\text{px}$) collected with integral field spectroscopy and adaptive optics allowed the study of the spatial distribution of the high ionization gas and model the emission line flux ratios $[\text{Si VI}]/\text{Br}\gamma$, $[\text{S IX}]/\text{Pa}\beta$, $[\text{Ca VIII}]/\text{Br}\gamma$ and $[\text{Si VII}]/\text{Br}\gamma$ using CLOUDY. We find that the coronal emission in the studied objects is extended to distances of up to 150-200 pc. The gas is distributed along the radio jet in each of the galaxies. The gas distribution is highly inhomogeneous, with multiple knots in emission. Channel maps show that coronal emission is turbulent, with high velocity dispersion, reaching values of 900 km s^{-1} . Photoionization models of CLOUDY show that photoionization is not the only physical mechanism responsible for the emission of coronal lines. Other processes such as shocks are necessary to explain the emission of the high ionization gas. Overall, our work highlights the need of high angular IFU observations to understand, more accurately, the physical processes associated to the central few parsecs in AGNs.

Keywords: Active galaxy nuclei. High ionization lines. Coronal lines. Photoionization. Infrared: galaxy.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Espectro óptico da galáxia Seyfert 1 NGC 5548.	4
1.2 Espectro óptico da galáxia Seyfert 2 Mrk 1157.	5
1.3 Esquemática do modelo unificado de AGNs.	8
1.4 Espectro infravermelho da galáxia Seyfert 2 Mrk 573.	12
1.5 Perfis de linha com diferentes potenciais de ionização observados em NGC 4507.	13
2.1 Esquema dos três tipos de IFUs.	18
2.2 IFU slicer.	19
2.3 Mapa em 4.9 GHz da galáxia NGC 1068 junto com observações em 15.0GHz.	25
2.4 Espectro da galáxia NGC1068 para 0.3" ao NE do núcleo.	26
2.5 Imagem em [O III] λ 5007 da região central de NGC 4151 obtida com o HST.	27
2.6 Espectro da galáxia NGC4151 a 0.1" ao NE do núcleo nas bandas J e K.	29
2.7 Espectro da galáxia NGC1386 para diferentes distâncias do núcleo	30
2.8 Espectro da galáxia ESO428-G14 para diferentes distâncias do núcleo	31
3.1 Interface do QFitsView	34
3.2 Esquema dos mapas das linhas de emissão desenhados com QFitsView	35
3.3 Representação esquemática da metodologia para realizar as tomografias das linhas de emissão	36
3.4 Interface do software LINER.	37
4.1 Mapa das linhas de alto potencial de ionização para a galáxia NGC 1068.	44
4.2 Mapa das linhas de baixo potencial de ionização para a galáxia NGC 1068.	45
4.3 Perfil de brilho para linhas de alto e baixo potencial de ionização na galáxia NGC 1068	46
4.4 Mapa da linha [Si VI] com os contornos de [O III] observados com o HST na galáxia NGC 1068.	47
4.5 Tomografia da linha coronal [Si VI] na galáxia NGC 1068	49
4.6 Tomografia do gás emissor de Br γ na galáxia NGC 1068	50
4.7 Perfil da linha [Si VI] na galáxia NGC 1068 em diferentes posições ao longo do campo de visada do IFU. A linha vermelha pontilhada representa a velocidade sistêmica da galáxia.	51
4.8 Velocidade do gás de [Si VI] e Br γ em função da posição na galáxia NGC 1068	52

4.9	Mapa das linhas de alto potencial de ionização para a galáxia NGC 4151	53
4.10	Mapa das linhas de baixo potencial de ionização e o gás molecular para a galáxia NG C4151	54
4.11	Perfil de brilho para as linhas de alto e baixo potencial de ionização na galáxia NGC 4151	55
4.12	Mapa da linha [Si VII] com a os contronos de [O III] do o HST de Hutchings et al. (1997) na galáxia NGC 4151.	56
4.13	Tomografia da linha coronal [Si VII] na galáxia NGC 4151	57
4.14	Tomografia do gás emissor de Br γ na galáxia NGC 4151.	58
4.15	Posição em função da velocidade do gás emissor de [Si VII] e Br γ na galáxia NGC 4151	59
4.16	Mapa das linhas de emissão observadas na galáxia NGC 1386.	60
4.17	Perfil de brilho para as linhas de alto e baixo potencial ionização para NGC 1386	61
4.18	Mapa da linha [Si VI] com os contornos de [O III] observada com o HST na galáxia NGC 1386	62
4.19	Tomografia da linha coronal [Si VI] para a galáxia NGC 1386	63
4.20	Tomografia do gás emissor de Br γ na galáxia NGC 1386	64
4.21	Gráfico posição-velocidade do gás emissor na galáxia NGC 1386	65
4.22	Mapa das linhas de emissão observadas na galáxia ESO 428-G14	66
4.23	Mapa da linha [Si VI] com os contornos 2cm com o VLA para a galáxia ESO 428-G14.	67
4.24	Mapa da linha [Si VI] com os contornos de Chandra ACIS-S 3-6 keV de ??) para a galáxia ESO 428-G14.	68
4.25	Perfil de Brilho para as linhas de alta e baixo potencial de ionização na galáxia ESO 428-G14	69
4.26	Tomografia da linha coronal [Si VI] na galáxia ESO 428-G14.	70
4.27	Tomografia do gás emissor de Br γ na galáxia ESO 428-G14.	71
4.28	Perfil da linha [Si VI] na galáxia ESO 428-G14 em diferentes posições ao longo do campo de visada do IFU. A linha vermelha pontilhada representa a velocidade sistêmica da galáxia.	72
4.29	Gráfico posição-velocidade para a galáxia ESO 428-G14	73
5.1	Predições dos modelos CLOUDY vs observações para a galáxia NGC1068.	77
5.2	Predições dos modelos CLOUDY vs observações para NGC4151.	79
5.3	Log(U) em função da distância para NGC4151	80
5.4	Predições dos modelos CLOUDY vs observações para NGC1386	81
5.5	Predições dos modelos CLOUDY vs observações para ESO428-G14 com a luminosidade nos raios X de ??).	82

5.6	Predições dos modelos CLOUDY vs observações para ESO428-G14 . . .	83
-----	---	----

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Propriedades das redes de difração usadas pelo SINFONI.	18
2.2 Propriedades das redes de difração usadas pelo NIFS.	20
2.3 Propriedades da amostra de galáxias.	21
2.4 Linhas de alto e baixo potencial de ionização presentes na amostra de galáxias.	21
2.5 Observações	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CL	–	Linhas Coronais
CLR	–	Região de linha coronais
SMBH	–	Buraco Negro Supermassivo
HST	–	Hubble Space Telescope
AGN	–	Nucleos Ativos de Galáxias
ISM	–	Interstellar medium
NLR	–	Região de linhas estreitas
BLR	–	Região de linhas largas

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO AOS NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS . . .	1
1.1 Propriedades dos AGNs	1
1.2 Tipos de AGNs	2
1.2.1 Quasares	2
1.2.2 Galáxias Seyfert	2
1.2.3 LINERs	4
1.2.4 Rádio Galáxias	6
1.3 Modelo Unificado	6
1.3.1 Toróide de gás e poeira	7
1.3.2 Região de Linhas Largas – BLR	8
1.3.3 Região de Linhas Estreitas - NLR	9
1.4 As Linhas Coronais	11
1.5 Coevolução entre a galáxia hospedeira e o buraco negro supermassivo . .	14
1.6 Motivação e objetivos	15
2 OBSERVAÇÕES E SELEÇÃO DA AMOSTRA	17
2.1 Espectroscopia de Campo Integral	17
2.2 IFUs Utilizados neste trabalho	17
2.2.1 SINFONI	18
2.2.2 NIFS	19
2.3 Seleção da amostra	20
2.4 Observações	21
2.4.1 NGC1068:	22
2.4.2 NGC4151:	22
2.4.3 NGC1386:	23
2.4.4 ESO428-G14:	23
2.5 Características da Amostra	24
2.5.1 NGC1068	24
2.5.2 NGC4151	27
2.5.3 NGC1386	28
2.5.4 ESO428-G14	30
3 METODOLOGIA	33

3.1	QFitsView	33
3.2	LINER	35
3.3	Cloudy	37
3.3.1	Equilíbrio de ionização	38
3.3.2	Equilíbrio térmico	39
4	MORFOLOGIA E CINEMÁTICA DO GÁS	43
4.1	NGC 1068	43
4.1.1	Morfologia do gás	43
4.1.2	Cinemática do gás	48
4.2	NGC 4151	51
4.2.1	Morfologia do gás	51
4.2.2	Cinemática do gás	55
4.3	NGC 1386	59
4.3.1	Morfologia do gás	59
4.3.2	Cinemática do gás	62
4.4	ESO 428-G14	65
4.4.1	Morfologia do gás	65
4.4.2	Cinemática do gás	68
4.5	Comparações Gerais	73
5	MODELOS DE FOTOIONIZAÇÃO	75
5.1	NGC1068	77
5.2	NGC4151	78
5.3	NGC1386	80
5.4	ESO428-G14	82
5.5	Fotoionização pela fonte central vs Choques	84
6	CONCLUSÕES	87
6.0.1	Perspectivas	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES DURANTE O PERÍODO DE MESTRADO	105
A.1	Artigo como co-autor	105

1 INTRODUÇÃO AOS NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS

Uma galáxia é um sistema gravitacionalmente ligado, composto de estrelas, gás e poeira. Historicamente, os núcleos das galáxias foram amplamente estudados por serem locais onde ocorrem fenômenos altamente energéticos que não são observados em outros lugares. Enquanto a radiação das estrelas e, portanto, das galáxias normais, está no espectro visível da radiação, aproximadamente 10% (HO, 2008) de todas as galáxias exibem um núcleo compacto muito brilhante que emite radiação em todos os comprimentos de onda, desde o rádio até os raios γ . Esses objetos são os chamados núcleos ativos de galáxias (denominados, aqui, AGNs do inglês *Active Galactic Nuclei*).

Os AGNs estão entre as fontes mais luminosas do Universo. Eles liberam uma quantidade de energia que pode exceder 10000 vezes a da galáxia hospedeira. Além disso, podem ser altamente variáveis, em escalas de horas a dias, indicando que o tamanho do AGN é menor que o nosso sistema solar. Entender como uma região tão pequena é capaz de gerar mais brilho do que a galáxia inteira é um dos principais objetivos da pesquisa neste campo. Especula-se que a energia emitida por esses objetos é gerada pela acreção de matéria em um buraco negro supermassivo (SMBH do inglês *Supermassive Black Hole*) localizado no centro da galáxia. Os processos que levam que levam a matéria localizada na região circumnuclear ser capturada pelo SMBH ainda são desconhecidos. Algumas galáxias ativas também mostram jatos de matéria com velocidades próximas à velocidade da luz. Sugere-se que parte do gás capturado pelo buraco negro é ejetado em forma de um cone de ionização e jatos. Esses jatos são detectados principalmente na região rádio e podem-se estender até dezenas de kiloparsecs do núcleo.

1.1 Propriedades dos AGNs

São chamadas, portanto, galáxias ativas, aquelas que hospedam um AGN. Pelo termo AGN, nos referimos a fenômenos altamente energéticos na região central da galáxia hospedeira, que não podem ser atribuídos a fenômenos estelares. Os núcleos ativos de galáxias são objetos que emitem radiação proveniente sobretudo da acreção de matéria por um buraco negro supermassivo no centro da galáxia hospedeira. A seguir são listadas as principais características dos AGNs, embora não necessariamente estejam presentes em todo AGN:

- Presença de duas regiões do espectro com excesso de emissão de contínuo

em comparação com galáxias normais. Uma região conhecida como *the big blue bump* associada ao disco de acreção e localizada $\sim 4000\text{\AA}$. E outra região, localizada em $\sim 1\mu\text{m}$ chamada *The IR bump* devida à emissão de grãos de poeira com temperatura $T \lesssim 2000\text{K}$.

- Sua distribuição espectral de energia (SED do inglês *Spectral energy distribution*) pode ser geralmente descrita por uma lei de potência, ou uma combinação delas.
- Podem apresentar grande variabilidade no contínuo e nas linhas de emissão no UV, óptico e raios x
- Os AGNs que são fontes rádio podem apresentar dois lóbulos rádio simétricos em torno da galáxia, a distâncias que variam desde 0.1 kpc até 1 Mpc. Estes AGNs podem apresentar jatos relativísticos ejetando matéria em direção aos lóbulos.

1.2 Tipos de AGNs

Devido às diferenças apresentadas entre galáxias ativas, tais como luminosidade, propriedades espectrais, variabilidade e contraste de brilho entre o núcleo e a galáxia hospedeira, podemos classificá-las em diferentes tipos:

1.2.1 Quasares

Os quasares são os AGNs mais luminosos ($L_{\text{Bol}} \sim 10^{45} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$, (WOO; URRY, 2002)), entre os quais de 5% a 10% são fontes rádio. Schmidt (1969) descreve algumas propriedades dos quasares: são objetos que na aparência lembram fontes estelares, mas são identificados como fontes rádio, possuem o fluxo do contínuo variável com o tempo, fluxo intenso no ultravioleta, linhas largas em emissão, e podem ser observados a $z \sim 7$ (MORTLOCK et al., 2011).

1.2.2 Galáxias Seyfert

As galáxias Seyfert são galáxias ativas de baixa luminosidade e próximas ($L_{\text{Bol}} \sim 10^{42} - 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$, (WOO; URRY, 2002; HO, 2008) e $z < 0.1$). Elas têm um núcleo tipo quasar, mas, ao contrário destes, a galáxia hospedeira é visível. A definição original destas galáxias é de Carl Seyfert (1943) e foi baseada principalmente em argumentos morfológicos. São galáxias com um núcleo de alto brilho superficial. Uma galáxia

Seyfert é similar a uma galáxia espiral normal mas com um núcleo brilhante e de aparência estelar.

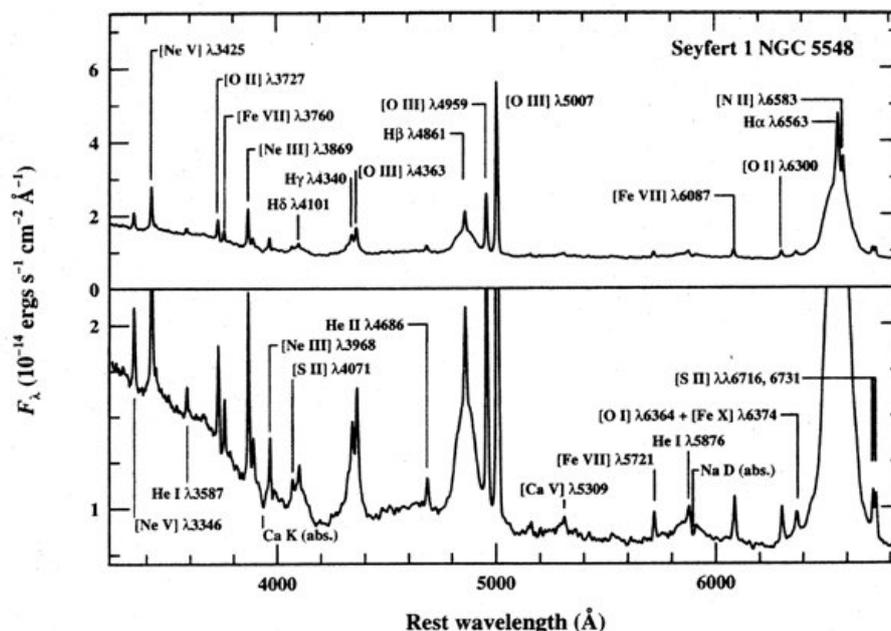
Os núcleos das galáxias Seyfert possuem linhas de emissão muito intensas. Entre as mais comuns encontram-se, por exemplo, linhas de hidrogênio da série de Balmer ($H\alpha$ e $H\beta$) e linhas de [O III], [S II] e [N II]. Além disso, no espectro também são observadas linhas com potenciais de ionização muito altos, tais como [Fe VII], [Fe X], [Si X], etc. Essas linhas são produzidas por um contínuo muito intenso, com energias superiores a 100 eV e que não podem ser emitidas por processos estelares.

Khachikian and Weedman (1974) foram os primeiros a separar as galáxias Seyfert em duas diferentes classes espectroscópicas: as galáxias Seyfert tipo 1 e tipo 2 (Sy1 e Sy2). As principais características espectroscópicas de cada uma são:

- As galáxias Seyfert Tipo 1 se caracterizam por um espectro com dois conjuntos de linhas de emissão diferentes que se sobrepõem: as linhas largas e as linhas estreitas. As primeiras têm larguras a meia altura (FWHM do inglês *Full Width Half Maximum*) com valores entre $1-5 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$. A região onde estas linhas são formadas é denominada a região de linhas largas (BLR do inglês *Broad Line Region*), sendo esta formada por nuvens fotoionizadas densas ($n_H > 10^{10} \text{ cm}^{-3}$). A estas densidades tão altas, as linhas proibidas são desexcitadas por processos colisionais. Por outro lado, as linhas estreitas têm FWHM menores, normalmente de centenas de quilômetros por segundo. Esta região, chamada região de linhas estreitas (NLR do inglês *Narrow Line Region*), têm densidades entre $10^3-10^6 \text{ cm}^{-3}$, portanto, consegue emitir linhas permitidas e proibidas. Na figura 1.1 observamos o espectro óptico de uma galáxia Seyfert tipo 1. A escala vertical é expandida no painel inferior para mostrar as características mais fracas.
- As galáxias Seyfert Tipo 2 possuem um espectro dominado por linhas permitidas e proibidas estreitas. Além disso, em geral, apresentam luminosidades menores e um contínuo estelar mais forte que as Seyfert tipo 1. Isto permite a observação de linhas de absorção devida à componente estelar da galáxia. Podemos ver o espectro óptico de uma galáxia Seyfert tipo 2 na figura 1.2.

Existem ainda classificações intermediárias entre Sy1 e Sy2 (OSTERBROCK, 1981). Estes objetos têm sido classificados como tipos 1.5, 1.8 ou 1.9, dependendo da intensidade relativa entre suas componentes largas e estreitas para um dado comprimento

Figura 1.1 - Espectro óptico da galáxia Seyfert 1 NGC 5548.



Fonte: Peterson (1997).

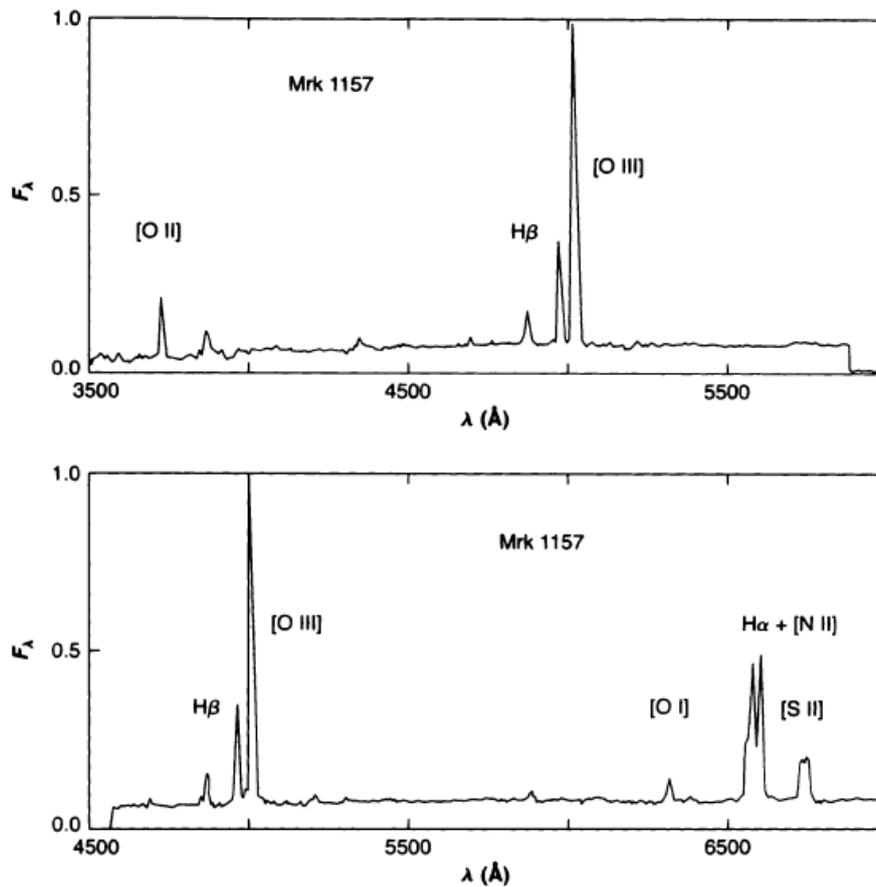
de onda. Para as Seyferts 1.5, os espectros têm componentes largas e estreitas nas linhas de Balmer. As Seyferts 1.8 têm uma componente larga e fraca nas linhas de $H\alpha$ e $H\beta$. Finalmente, as galáxias Seyfert 1.9 só têm uma componente larga na linha de $H\alpha$. Embora seja muito comum encontrar na literatura esta notação, atualmente, só é utilizada a classificação Seyfert 1 e Seyfert 2.

1.2.3 LINERs

São um tipo de AGN de baixa luminosidade (com $L_{\text{Bol}} \sim 10^{39} - 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ (HO, 2008)), caracterizado por um espectro com linhas de emissão de baixa ionização e profundas bandas de absorção estelar. A primeira classificação deles foi feita por Heckman (1980). Esses objetos representam uma porcentagem muito elevada de galáxias ativas, encontrada em quase metade das galáxias espirais do universo local.

Os LINERs podem ou não apresentar uma BLR, sendo detectada uma componente larga na linha em emissão $H\alpha$ em 25% dos casos. De fato, existem LINERs que

Figura 1.2 - Espectro óptico da galáxia Seyfert 2 Mrk 1157.



Fonte: Osterbrock and Ferland (2006).

contém uma BLR oculta, tal como foi encontrado por Barth et al. (1999).

Embora as propriedades espectroscópicas destas galáxias sejam conhecidas, a sua fonte de ionização ainda é assunto de discussão. Alguns possuem variabilidade no óptico ou UV, apresentam um pico duplo nas linhas largas de Balmer (STORCHBERGMANN et al., 1997) e outros abrigam um núcleo compacto em rádio com emissão no espectro de raios-X duros (HO; PENG, 2001). Estas observações fornecem evidências da presença de um AGN como fonte de emissão.

1.2.4 Rádio Galáxias

São galáxias que têm uma emissão rádio muito intensa, ($L = 10^{41}$ erg s⁻¹). Quando são observadas no óptico, geralmente têm aparência de uma galáxia elíptica gigante, mas, observadas em rádio, apresentam uma estrutura dupla, com dois lóbulos emissores em rádio, localizados um em cada lado da galáxia elíptica, e com distâncias que chegam até 6 Mpc de seu centro. Os lóbulos estão conectados ao núcleo por um jato colimado de matéria.

Apresentam um espectro óptico com fortes linhas de emissão e por esse motivo dividem-se em duas subclasses: rádio-galáxias emissoras de linhas estreitas (NLRG, do inglês *Narrow Line Radio Galaxies*) e rádio-galáxias de linhas largas (BLRG, do inglês *Broad Line Radio Galaxies*). Essas duas classificações ocorrem por motivos análogos ao que acontece nas Seyferts 1 e 2 respectivamente (OSTERBROCK; FERLAND, 2006). De fato, as rádio galáxias são as equivalentes espectroscópicas das galáxias Seyferts mas com forte emissão rádio. Ao contrário destas últimas, que ocorrem em galáxias espirais, as primeiras ocorrem em galáxias elípticas (MCLURE et al., 1999).

1.3 Modelo Unificado

O modelo unificado dos AGNs foi introduzido por Miller and Antonucci (1983) para explicar as diferenças observadas no espectro de diferentes tipos de galáxias ativas. A primeira explicação dada pela ausência de linhas largas no espectro de AGNs tipo 2 foi simplesmente que em tais galáxias, faltava a região de linhas largas (FERLAND; OSTERBROCK, 1986). No entanto, a descoberta de linhas largas no espectro de luz polarizada da galáxia NGC 1068 (ANTONUCCI; MILLER, 1985) alterou radicalmente essa ideia, fixando a base do modelo atual de unificação. Neste contexto, a ausência de linhas largas no espectro de AGNs tipo 2 é devido ao efeito de orientação relativo entre o observador e a fonte central.

Pelo modelo unificado atual, o centro de um AGN é ocupado por um buraco negro com massa entre 10^6 e 10^{10} M_{\odot} rodeado por um disco de acreção (ANTONUCCI, 1993). Pela grande quantidade de energia gerada devido à acreção em um potencial gravitacional, a região interna possui uma temperatura de até 10^5 K, o que gera a intensa emissão no óptico/UV que é uma característica dos AGNs. Este mecanismo central, formado pelo buraco negro e o disco de acreção, está rodeado pelas nuvens da BLR, que é a região onde as linhas largas são geradas. Essas nuvens movem-se rapidamente devido a sua proximidade com a fonte central. Localizada a um raio

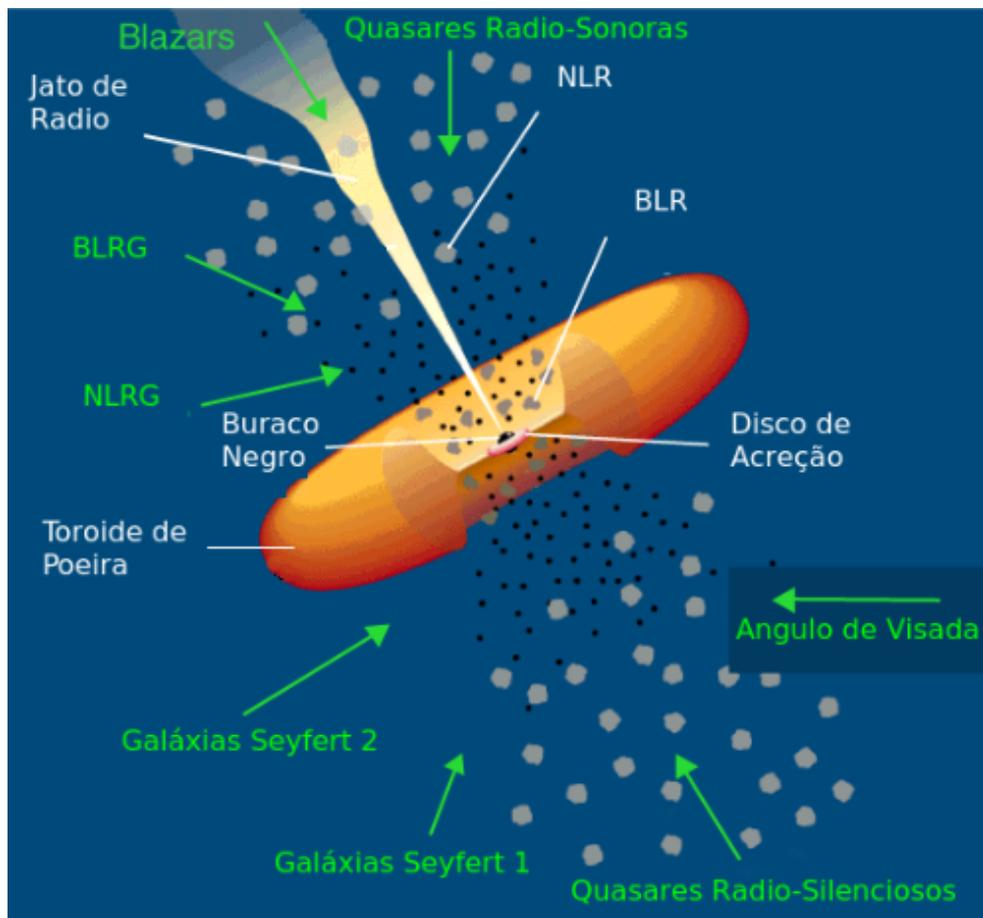
maior e, portanto, com velocidades menores, está a NLR, responsável pelo espectro de linhas estreitas. O elemento chave do modelo unificado é o toróide de gás e poeira localizado entre a BLR e a NLR, que impede a visão da BLR e da fonte central para determinadas orientações. Assim, os AGNs tipo 1 possuem uma orientação que privilegia uma vista direta da BLR e da fonte central. Por outro lado, os tipo 2 têm uma inclinação tal que impedem a visão das duas últimas, sendo escondido pelo toróide (ANTONUCCI, 1993). Para este tipo de orientação temos apenas emissão da NLR e contínuo infravermelho produzido pelo toróide. O modelo se baseia em uma estrutura como é mostrado na Figura 1.3. Na figura as setas indicam as diferentes classes de AGNs de acordo com o ângulo que a linha de visada faz com o toróide e o jato. AGNs possuindo jatos em rádio com a BLR obscurecida denominam-se de Rádio-Galáxias de Linhas Estreitas (NLRGs, em inglês *Narrow Line Radio Galaxies*), se não denominam-se Rádio-Galáxias de Linhas Largas (BLRGs). Os AGNs cuja BLR é detectável são ditas Seyferts 1, e com a BLR obscurecida são as Seyferts 2. Na direção do pólo e na ausência de emissão em rádio são ditos Quasares Rádio-Silenciosos (*Radio Quiet Quasars*).

Resultados recentes, com base em uma amostra Swift/BAT sugerem que a diferença fundamental entre objetos de Tipo I e II não é devida a efeitos de orientação entre o observador e a fonte central e sim à taxa de acreção do BH central (RICCI et al., 2017).

1.3.1 Toróide de gás e poeira

Diversos trabalhos vem explorando a distribuição da matéria no toróide desde a proposta do Modelo Unificado por Antonucci and Miller (1985), fazendo uso de diferentes métodos computacionais para a resolução da equação de transporte radiativo para o meio toroidal. Pier and Krolik (1992) sugeriram um modelo para emissão da poeira em uma estrutura toroidal em forma de anel com densidade uniforme. Outros trabalhos também utilizam distribuições de densidade semelhantes, modificando o perfil e formato do toróide (GRANATO; DANESE, 1994; ??; DULLEMOND; BEMMEL, 2005; FRITZ et al., 2006). Outra abordagem para a distribuição da poeira é considerar que ela está aglomerada em forma de nuvens na estrutura toroidal. O primeiro modelo de nuvens “clumpy” foi desenvolvido por Nenkova et al. (2002), que considera o toróide formado por nuvens de poeira, reproduzindo SEDs teóricas a partir do cálculo de transferência radiativa das nuvens considerando a absorção, emissão e espalhamento dos fótons devidos aos grãos de poeira. Vale ressaltar que, conforme a capacidade computacional aumenta, ambos os tratamentos para a geo-

Figura 1.3 - Esquematisação do modelo unificado de AGNs.



Fonte: Urry and Padovani (1995).

metria toroidal vêm reproduzindo bons resultados, quando são comparados com as SEDs observadas dos AGNs (STALEVSKI et al., 2012).

1.3.2 Região de Linhas Largas – BLR

A região de linhas largas está localizada ao redor do disco de acreção e é a região na qual, de acordo com o cenário padrão dos AGNs, as componentes largas das linhas de emissão visíveis nos espectros desses objetos são formadas. Em média, a largura total a meia altura dessas linhas é de 5000 km s^{-1} . Uma característica fundamental a ser mencionada é que apenas linhas permitidas e de intercombinação são geradas nessa região, já que não são observadas linhas proibidas com componentes tão largas quanto essas. A única explicação é que o gás da BLR é caracterizado por uma elevada densidade. Dessa forma, as linhas proibidas, que são originadas por transições

a partir de níveis energéticos dos íons com menores valores de densidade crítica, não podem ser geradas, já que a desexcitação colisional impede que tais transições ocorram.

As linhas proibidas são usadas como traçadoras de densidade, portanto determinar a densidade da BLR é difícil. Entretanto, algumas estimativas podem ser realizadas. As linhas proibidas $[\text{O III}]\lambda 4363, 4959, 5007$, não apresentam uma componente larga nos espectros dos AGNs. Como a densidade crítica do nível $1S_0$ do íon O III , que dá origem à transição correspondente à linha $[\text{O III}]\lambda 4363$ é $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$, conclui-se que esse é um valor adequado para o limite inferior da densidade da BLR. Por outro lado, uma componente larga da linha de $\text{C III}]\lambda 1909$ tem sido observada em diversos AGNs. Como a densidade crítica do nível $3P_1$ do íon C III é $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, infere-se que 10^9 cm^{-3} é um valor aceitável para a densidade da BLR.

Para a temperatura da BLR não é possível obter informações diretas, pois as linhas permitidas de H I , He I e He II não são úteis para fazer estimativas de temperatura. Entretanto, a presença abundante de linhas largas de Fe II nos espectros de AGNs indica que a temperatura da BLR deve ser inferior a 35000 K, visto que, para temperaturas maiores do que essa, os íons de Fe II estariam totalmente ionizados na forma de Fe III . Assim, pode-se concluir que $T = 10^4 \text{ K}$ corresponde a uma estimativa razoável para a temperatura da BLR.

A distribuição das nuvens de gás na BLR ainda é assunto de debate. Não existe um consenso definitivo acerca da dinâmica e da estrutura espacial da BLR, contudo os modelos devem satisfazer as observações de que o seu movimento é dominado por rotação ao invés de fluxo radial e que a BLR não é coplanar com respeito ao disco (WANDERS et al., 1995).

1.3.3 Região de Linhas Estreitas - NLR

A região de linhas estreitas encontra-se em uma zona externa à BLR e é o local no qual as linhas de emissão estreitas (incluindo as linhas proibidas) visíveis nos espectros dos AGNs são formadas. As larguras típicas dessas linhas são tais que $200 \text{ km s}^{-1} \leq \text{FWHM} \leq 900 \text{ km s}^{-1}$, sendo que, na maioria dos casos, $\text{FWHM} = 350\text{--}400 \text{ km s}^{-1}$ (ANTONUCCI, 1993; PETERSON, 1997). Como as linhas proibidas visíveis nos espectros apenas são produzidas nessa região (já que não apresentam componentes largas), pode-se concluir que se trata de uma região na qual as densidades são inferiores às da BLR.

Razões de linhas como $[\text{O III}](\lambda 4959 + \lambda 5007)/[\text{O III}]\lambda 4363$ e $[\text{N II}](\lambda 6548 + \lambda 6583)/[\text{N II}]\lambda 5755$ (que são bastante sensíveis à temperatura do gás) revelam que a temperatura da NLR nos AGNs deve ser próxima a 10^4 K.

A razão $[\text{S II}]\lambda 6716/[\text{S II}]\lambda 6731$, revela densidades com valores entre $10^2 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$ para a NLR dos AGNs, assim, um valor intermediário razoável para a densidade é 10^3 cm^{-3} (OSTERBROCK; FERLAND, 2006).

Ao contrário da BLR, a NLR pode, geralmente, ser espacialmente resolvida com telescópios na Terra. Estudos indicam que essa região é bem mais extensa do que a BLR, com distâncias de até 10^3 pc do buraco negro central (HECKMAN et al., 1984). Estudos da NLR (feitos, por exemplo, através de filtros de banda estreita centrados em linhas de emissão) revelam que, em geral, a morfologia dessa região tende a ser mais assimétrica do que simétrica (ROBERTIS; SHAW, 1990). O eixo da NLR costuma coincidir com o eixo do jato rádio (nos objetos onde emissão em rádio estendida foi detectada) (POGGE, 1988; WILSON et al., 1992), o que parece indicar alguma conexão entre essas duas emissões. Em algumas fontes, a região emissora de rádio mostra indícios da existência de ondas de choque, sobretudo na região divisória entre o plasma emissor de rádio e o meio interestelar da galáxia. Isso parece indicar que o plasma que está fluindo radialmente para fora gera ondas de choque ao colidir com o ambiente da NLR.

Algumas estruturas comumente vistas nos AGNs são os cones de ionização, que possuem uma forma de cunha com ângulos de abertura entre 30 e 100 graus, e correspondem a regiões nas quais pode ser detectada emissão vindo de espécies de mais alta ionização. Em geral, a região contendo esses cones de ionização é chamada de Região de Linhas Estreitas Estendida (ENLR do inglês *Extended Narrow Line Region*), que se diferencia da NLR clássica pelo fato de possuir menor brilho superficial e estar mais afastada do núcleo (CRACCO et al., 2011). Os cones de ionização mostram que a emissão da radiação é anisotrópica ou que, pelo menos, se torna anisotrópica a distâncias de kiloparsecs da fonte de radiação central (CRACCO et al., 2011).

Müller-Sánchez et al. (2011) encontraram uma anti-correlação entre θ_{cone} (metade do ângulo de abertura do cone) e a massa molecular do gás $M_{gás}$ para distâncias menores que 30 pc. Portanto, em núcleos mais massivos o gás têm maior grau de colimação no cone e maiores velocidades de ejeção, confirmando que o toro, de fato, é a estrutura responsável por regular a abertura dos cones de ionização e alimentar o buraco negro central. A quantidade de gás molecular nessas escalas, portanto, tem

um grande impacto nos processos físicos inerentes ao AGN.

1.4 As Linhas Coronais

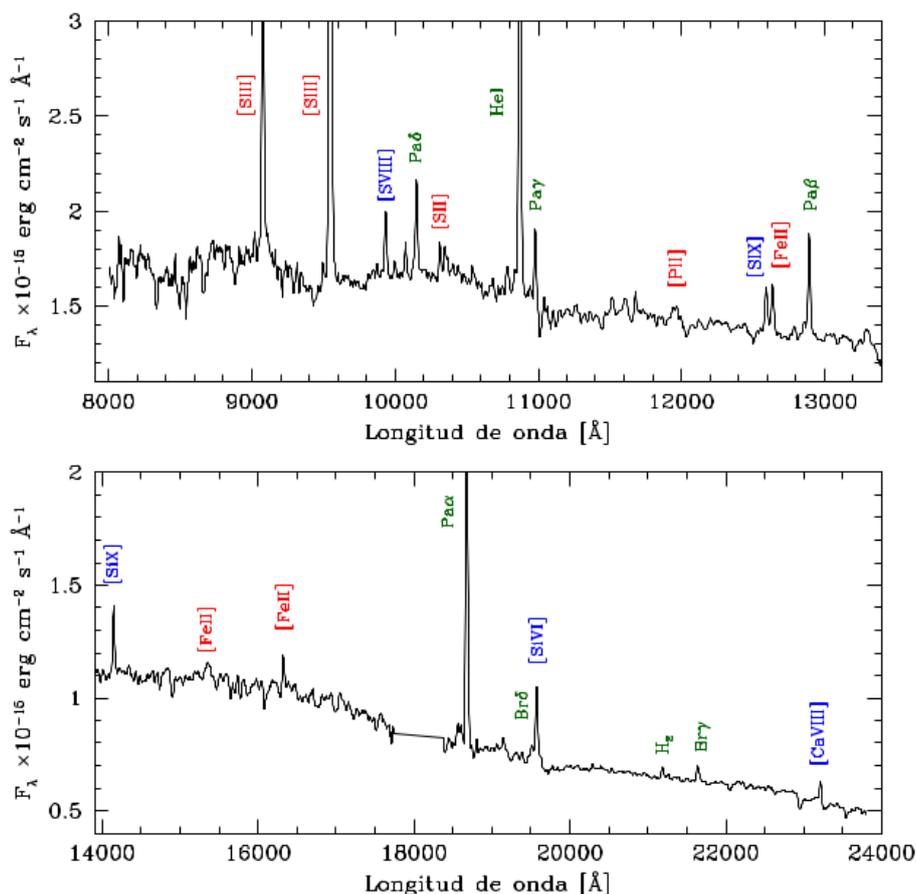
Além das linhas largas e estreitas já mencionadas, os AGNs mostram linhas de emissão de íons altamente ionizados em seus espectros, conhecidas como linhas coronais (CLs, do inglês, *Coronal Lines*). O nome originou-se pelo fato de serem observadas pela primeira vez na coroa do sol. Essas linhas são transições proibidas produzidas por colisões dentro dos níveis baixos de espécies altamente ionizadas, com potenciais de ionização $IP \geq 100$ eV. As transições que produzem as linhas coronais são proibidas pela regra de seleção $\Delta l = 0$ (ocorrendo entre os níveis com as mesmas configurações), mas com diferentes valores de momento angular total.

As CLs foram detectadas nos espectros ópticos e infravermelhos de todos os tipos de galáxias Seyfert (SEYFERT, 1943; PENSTON; PÉREZ, 1984; NAGAO et al., 2000; STURM et al., 2002; RODRIGUEZ-ARDILA et al., 2002; RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2006; MULLANEY; WARD, 2008; KOMOSSA et al., 2008; GELBORD et al., 2009). Elas também são observadas em radiogaláxias (HOLT et al., 2006). A Figura 1.4 mostra o espectro infravermelho de uma galáxia Seyfert, com algumas das CLs tipicamente observadas em AGNs. As linhas permitidas são indicadas em verde, em vermelho as linhas proibidas e em azul as linhas coronais.

Embora as CLs representem um dos principais componentes gasosos dos núcleos ativos, a natureza e a origem das CLs ainda não estão claras. Vários modelos foram considerados para explicá-las, incluindo modelos de ventos do toro molecular (PIER; VOIT, 1995; NAGAO et al., 2000), plasma na condição de absorvedor ionizado (KOMOSSA; FINK, 1997), uma componente de ionização da parte mais interna da NLR (KOMOSSA; SCHULZ, 1997; FERGUSON et al., 1997; BINETTE et al., 1997) e uma componente de baixa densidade do meio interestelar (KORISTA; FERLAND, 1989).

Desde a década de 70 foram reportadas evidências de que as CLs ópticas são mais largas que as linhas proibidas de baixa ionização (PHILLIPS; OSTERBROCK, 1975; COOKE et al., 1976) e que seu centro está deslocado em direção ao azul em relação à velocidade sistêmica da galáxia (GRANDI, 1978; PENSTON; PÉREZ, 1984; RODRIGUEZ-ARDILA et al., 2002). Este fato foi interpretado como evidência de que a região onde são produzidas as linhas coronais (CLR do inglês *Coronal Line Region*) está localizada mais próxima do núcleo do que a NLR e provavelmente está associada a ventos (WARD; MORRIS, 1984; MULLANEY et al., 2011).

Figura 1.4 - Espectro infravermelho da galáxia Seyfert 2 Mrk 573.

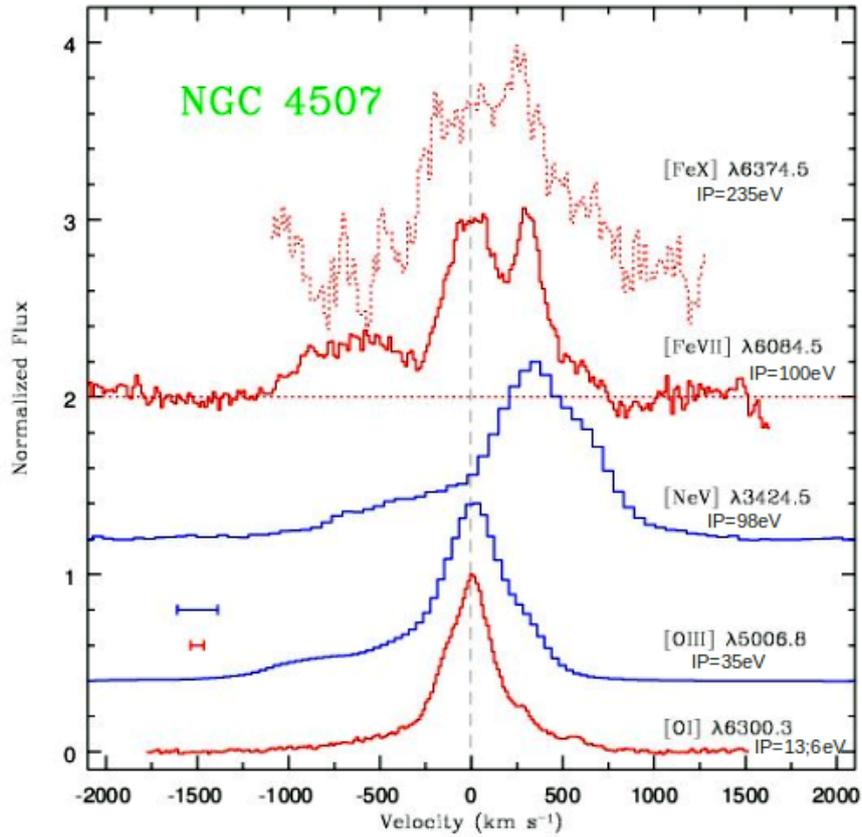


Fonte: Mazzalay et al. (2010).

Como evidência do cenário anterior vemos a correlação encontrada em algumas galáxias Seyfert entre o potencial de ionização (IP) necessário para criar as espécies ionizadas e a largura das linhas, observando que, as linhas com maior IP possuem larguras maiores (WILSON; PENSTON, 1979; PELAT et al., 1981; EVANS, 1988; ERKENS et al., 1997). A Figura 1.5 mostra uma comparação dos perfis de diversas linhas observados na galáxia Seyfert 2 NGC4507, onde pode-se ver que na medida que o IP aumenta, as linhas são mais largas e seus centros se deslocam em direção a comprimentos de onda menores.

Devido ao fato de que a CLR é menos extensa do que a NLR, na maioria dos estudos observacionais, as CLs não podem ser resolvidas espacialmente. Um modo mais direto de resolver a CLR só foi possível através do telescópio espacial Hubble (HST) e espectroscopia de campo integral feita com telescópios terrestres.

Figura 1.5 - Perfis de linha com diferentes potenciais de ionização observados em NGC 4507.



Fonte: Figura cedida por Alberto Rodríguez Ardila.

Avanços recentes na compreensão do CLR incluem a determinação do tamanho e da morfologia do gás de alta ionização em alguns objetos por meio de imagens e espectros infravermelhos tomados com o HST ou com telescópios terrestres usando óptica adaptativa (THOMPSON et al., 2001; PRIETO et al., 2005; SÁNCHEZ et al., 2006; RIFEL et al., 2008; BEDREGAL et al., 2009; STORCHI-BERGMANN et al., 2009; STORCHI-BERGMANN et al., 2010; MAZZALAY et al., 2010; MAZZALAY et al., 2013). Os resultados mostram CLR com tamanhos que variam de alguns parsecs (~ 30 pc) até regiões de ~ 200 pc, de preferência alinhadas com a direção dos cones de baixa ionização observados nessas fontes. Além disso, o tamanho da região de emissão das espécies mais altamente ionizadas é menor, o que concorda com o modelo de fotoionização do gás pela fonte central.

O estudo das CLs é importante por vários motivos. Em primeiro lugar, devido aos

potenciais de ionização elevados necessários para produzir CLs, elas rastreiam uma parte importante do contínuo ionizante que vai desde o ultravioleta extremo até raios X suaves, que não é diretamente acessível a partir de observações devido à absorção Galáctica. Em segundo lugar, a CL $[\text{Ne v}]\lambda 3426$ é muitas vezes a única linha proibida identificada nos espectros dos AGNs mais distantes e, portanto, pode ser usada para identificar AGNs em catálogos profundos (GOULDING et al., 2010). No futuro, as propriedades desta linha (fluxo e perfil) podem ser usadas como um diagnóstico das propriedades de AGNs, incluindo uma medida da dispersão de velocidade da galáxia hospedeira. Uma melhor compreensão do lugar e das condições de formação dessas linhas é, portanto, de grande interesse. Em várias galáxias, há evidências fortes de que a maior parte da CLR é originada em ventos (ERKENS et al., 1997; MULLANEY et al., 2009). Se isto é uma propriedade global da CLR em todos os AGNs, seu estudo nos proporciona novos vínculos sobre os mecanismos de formação e produção de tais ventos no próprio núcleo de AGNs. Portanto, as observações de alta resolução espacial são essenciais para resolver as escalas mais próximas do núcleo onde os ventos se formariam. As larguras, os perfis e os deslocamentos em comprimentos de onda das CLs são diagnósticos importantes desses processos de energia em regiões próximas da fonte central.

1.5 Coevolução entre a galáxia hospedeira e o buraco negro supermassivo

Existe uma correlação muito estreita entre a massa do buraco negro e propriedades da galáxia, tal como luminosidades e a dispersão de velocidades do bojo (FERRARESE; MERRITT, 2000), que revela uma conexão ainda incompreendida, mas que certamente mostra que a evolução de ambas estão estreitamente vinculadas. Essa relação é conhecida como a relação de Margorjan. Por meio dela é estipulado que a massa do buraco negro (M_{BH}) está correlacionada com a dispersão de velocidades estelar (σ). Essa relação indica que os buracos negros supermassivos alteram o caminho evolutivo de suas galáxias hospedeiras ao limitar a formação estelar que acontece nos seus bojos.

É amplamente aceita a hipótese de que os mecanismos de retroalimentação (do inglês, *feedback*), na forma de escoamentos de gás e jatos, é um dos principais motores da co-evolução de galáxias ativas e seus buracos negros supermassivos (BARBOSA et al., 2009; MÜLLER-SÁNCHEZ et al., 2011; RIFFEL; STORCHI-BERGMANN, 2011). O jato-rádio interage de várias formas com seu entorno, varrendo o gás do meio-ambiente através de frentes de choque. Enquanto a interação jato/gás afeta localmente o

campo de velocidades do meio circundante, os choques podem influenciar significativamente ou dominar as intensidades das linhas em emissão. Portanto, o estudo de galáxias próximas no óptico e no infra-vermelho próximo é peça-chave para entender em detalhe a interação jato/gás através de espectroscopia espacial e espectralmente resolvida de linhas de emissão de alta ionização.

Este trabalho situa-se neste campo da coevolução entre galáxia hospedeira e seu SMBH. Pretende-se estudar os fenômenos de *feedback*, ao investigar as linhas coronais, dado que elas podem ser utilizadas como traçadoras de escoamentos de gás.

1.6 Motivação e objetivos

Na tentativa de compreensão dos mecanismos físicos que levam à atividade nuclear, tornou-se importante a busca dos vínculos entre a evolução do AGN e de sua galáxia hospedeira. Estudos têm investigado os processos pelos quais o AGN ejeta matéria para suas regiões mais externas e enriquece o gás da galáxia hospedeira (*outflows*) (RODRIGUEZ-ARDILA et al., 2002; RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2006; MÜLLER-SÁNCHEZ et al., 2011; COMBES, 2014), outros estudos têm buscado fazer deduções sobre como acontece o escoamento de matéria da galáxia hospedeira para o AGN, das regiões mais externas deste para as mais internas (*inflows*) (GASKELL; GOOSMANN, 2013). Nesse sentido, o estudo do perfil das CLs, comparando-os com as linhas de menor potencial de ionização têm grande importância.

Outro assunto de interesse é a origem das CLs. Três diferentes cenários têm sido propostos para explicar isso: um gás fotoionizado por um contínuo ultravioleta (UV) duro (FERGUSON et al., 1997), um plasma colisionalmente ionizado (CONTINI; VIEGAS-ALDROVANDI, 1990; DOPITA; SUTHERLAND, 1995; ALLEN et al., 2004) ou uma mistura de ionização colisional mais fotoionização pela fonte central (VIEGAS-ALDROVANDI; CONTINI, 1989; CONTINI et al., 1998; ??; RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2006). Estudos de alta resolução espacial de galáxias próximas são essenciais para entender os efeitos e as contribuições de choques e fotoionização na formação das linhas coronais.

Assim, com base no que foi escrito acima, este trabalho têm por objetivos:

- Introduzir a estudante no problema da atividade nuclear e, em particular, o das linhas de alta ionização assim como treiná-la na análise e interpretação de dados coletados com espectrógrafos de campo integral;
- Estudar uma amostra de 4 AGNs próximos, com emissão de linhas coronais

intensas, com o intuito de caracterizar os seus perfis de linhas em emissão;

- Estudar a morfologia e a cinemática do gás de alta ionização e comparar com as linhas de baixa ionização;
- Procurar informações sobre os processos físicos responsáveis pela emissão de linhas de alta ionização.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 são descritas as observações e é apresentado os espectros reduzidos de cada objeto. No capítulo 3, é detalhada a metodologia utilizada. No capítulo 4, é exposto um estudo sobre a emissão coronal e a análise da cinemática do gás. No capítulo 5, é apresentada a análise dos modelos de fotoionização e no capítulo 6, são exibidas as conclusões e perspectivas.

2 OBSERVAÇÕES E SELEÇÃO DA AMOSTRA

Apresenta-se nesta seção uma breve descrição da espectroscopia de campo integral, dos instrumentos utilizados e uma resenha de cada objeto, com dados apresentados na literatura e algumas notas sobre os espectros reduzidos.

2.1 Espectroscopia de Campo Integral

Os espectrógrafos de campo integral permitem obter espectros em um campo bidimensional em uma única exposição. O produto final é um cubo de dados com dois eixos espaciais e um eixo que contém a informação espectral para cada posição espacial. Esta técnica foi desenvolvida com a finalidade de solucionar as desvantagens tradicionais da espectroscopia de fenda longa (por exemplo, cobertura espacial reduzida de objetos estendidos). Por essa razão, a espectroscopia de campo integral é uma técnica poderosa para estudar os AGNs, sendo amplamente utilizada hoje em dia na maior parte dos trabalhos que envolvem esses objetos.

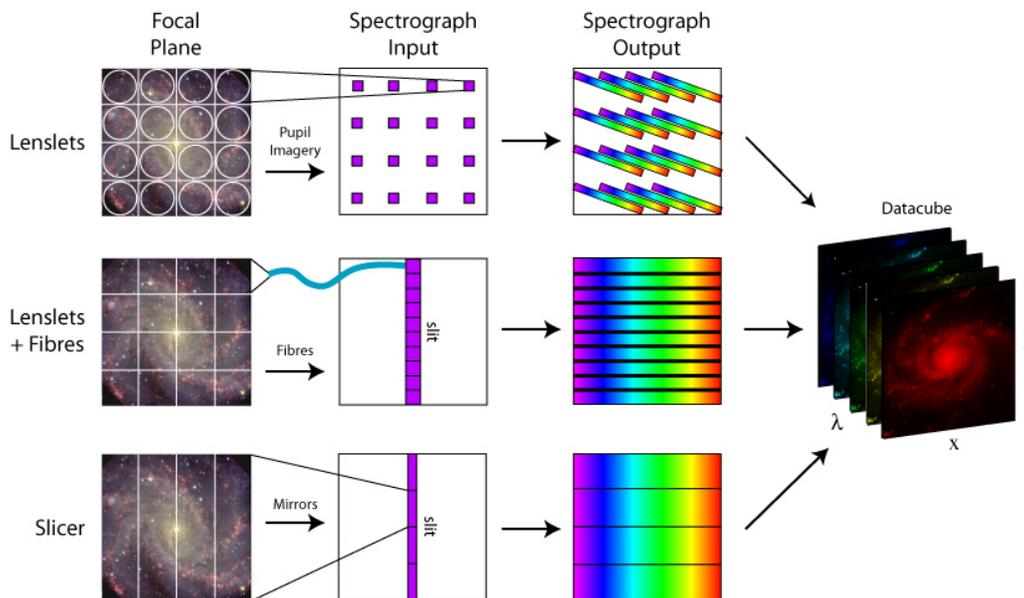
As unidades de campo integral (IFU do inglês, *Integral Field Unit*) podem ser de três tipos: *lenslet*, *fiber* e *slicer*. O IFU *lenslet* usa uma coleção de lentes para o campo de visão. A luz é interceptada por cada lente, focada em um ponto e dispersada. O IFU *fiber* utiliza fibras ópticas no plano focal do aparelho formando uma imagem de entrada bidimensional, que é então reordenada em pseudo-fendas e espalhada pelo espectrógrafo. O IFU *slicer* utiliza um conjunto de espelhos no plano focal do telescópio para cortar o campo de visão em uma série de fatias. Depois, com um segundo conjunto de espelhos, são reorganizadas formando a fenda do espectrógrafo. A Figura 2.1 mostra um esquema dos três tipos de IFUs.

A óptica adaptativa funciona melhor em comprimentos de onda no infravermelho próximo. Portanto, a maior parte dos instrumentos IFU atuais são desenvolvidos para serem usados em comprimentos de onda do infravermelho, otimizando a resolução angular para aproveitar o limite de difração do telescópio em condições de *seeing* natural.

2.2 IFUs Utilizados neste trabalho

Neste trabalho foram utilizadas os IFU SINFONI, instalado no telescópio VLT, e NIFS instalado no telescópio Gemini. Alguns detalhes dos instrumentos são descritos a seguir:

Figura 2.1 - Esquema dos três tipos de IFUs.



Fonte: Allington-Smith et al. (2000)

2.2.1 SINFONI

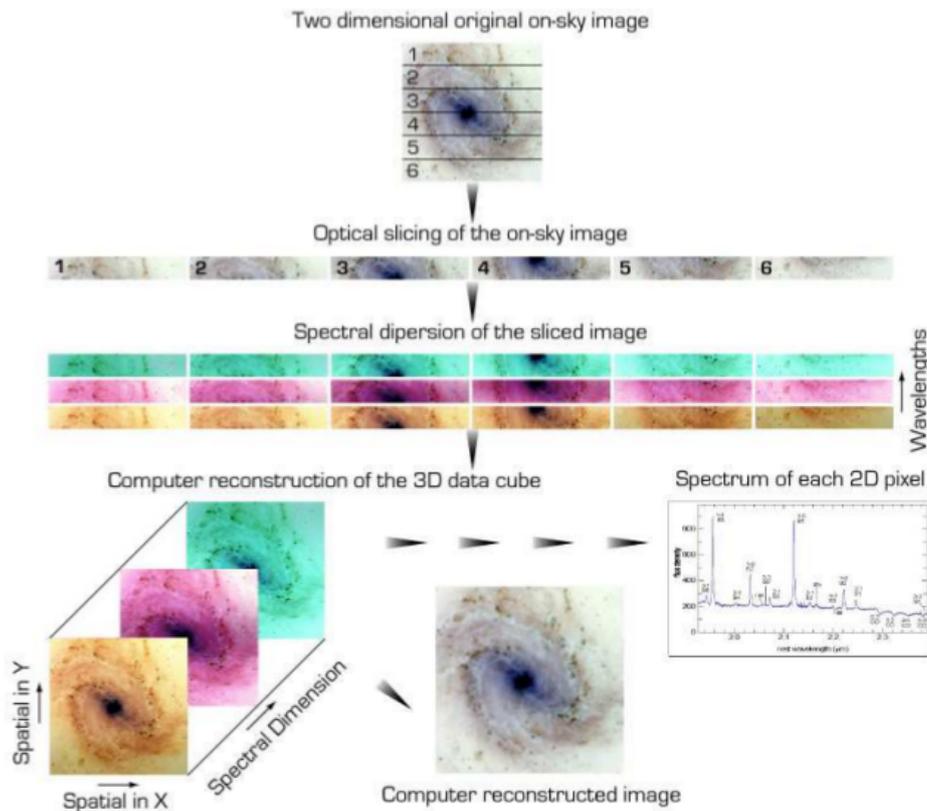
O SINFONI (*SIN*gle *F*aint *O*bject *N*ear *I*nfrared *I*nvestigation) é um sistema de óptica adaptativa desenvolvido pelo ESO (do inglês, *European Southern Observatory*) em combinação com um espectrógrafo de campo integral para o infravermelho próximo (NIR do inglês, *Near Infrared*) construído pelo *Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics* (MPE). Ele está instalado no observatório do ESO no telescópio U4 do VLT (*Very Large Telescope*) e opera em 4 bandas: J, H, K e H+K. Apresenta um campo de 3.65×2.62 arcsec. A tabela 2.1 apresenta as especificações das redes de difração usadas pelo SINFONI.

Tabela 2.1 - Propriedades das redes de difração usadas pelo SINFONI.

Red	$\lambda_{central}$ (μm)	Intervalo Espectral (μm)	$\lambda/\Delta\lambda$
J	1.25	1.10-1.40	2000
H	1.65	1.45-1.85	3000
K	2.20	1.95-2.45	4000
H+K	1.95	1.45-2.45	1500

O SINFONI usa a técnica de "image slicer" como é mostrado na figura 2.2. Uma imagem bidimensional é cortada em componentes menores e reposicionada por espelhos colocados um ao lado do outro. Isso essencialmente forma uma fenda virtual muito longa. A luz da fenda virtual é dispersada e, portanto, separada em comprimentos de onda, e a imagem é então reconstruída a partir das fatias individuais em cada comprimento de onda. Por último, eles são combinados para nos dar a informação final em 3D.

Figura 2.2 - IFU slicer.



Fonte: ESO (24 de agosto de 2004)

Neste trabalho só dispomos de dados na banda K do SINFONI.

2.2.2 NIFS

O espectrógrafo de campo integral do telescópio Gemini Norte, NIFS (do inglês, *Near-Infrared Integral Field Spectrograph*), é de tipo *slicer* e foi construído pela

Australian National University's Research School of Astronomy and Astrophysics (MCGREGOR et al., 2003). Funciona atualmente no telescópio de 8.1 m Gemini Norte em Mauna Kea, Hawai. O NIFS provê espectroscopia de campo integral que proporciona uma resolução espectral ($\lambda/\Delta\lambda$) de $R\sim 5000$ num campo de $3''\times 3''$ nas bandas espectrais Z, J, H e K ($0.94 - 2.40 \mu\text{m}$). O NIFS divide o plano do céu em 29 fatias, cada uma de $0.103''$ de largura. A escala espacial ao longo das fatias é $0.044''/\text{pixel}$.

NIFS pode operar em conjunto com o sistema de óptica adaptativa ALTAIR1, possibilitando a obtenção de dados espectroscópicos de alta qualidade resolvidos espacialmente em escalas angulares próximas a $0.1''$. Na tabela 2.2 é apresentado um resumo das principais propriedades das redes de difração utilizadas pelo NIFS e suas diferentes configurações. Este instrumento é ideal para estudar a NLR de galáxias ativas no NIR, dado que proporciona uma alta resolução espacial e espectral. O NIFS funciona próximo do limite de difração ($\text{FWHM}\sim 0.06''$ na banda K), com uma resolução de $0.1''$.

Tabela 2.2 - Propriedades das redes de difração usadas pelo NIFS.

Red	$\lambda_{central}$ (μm)	Intervalo Espectral (μm)	$\lambda/\Delta\lambda$
Z	1.05	0.94-1.15	4990
J	1.25	1.15-1.33	6040
H	1.65	1.49-1.80	5290
K	2.20	1.99-2.40	5290

2.3 Seleção da amostra

É de interesse deste trabalho estudar as condições físicas da região central de galáxias ativas com alta resolução espacial. Selecionamos uma amostra de galáxias Seyfert do universo local ($z<0.03$). A amostra esta constituída pelas galáxias Seyfert NGC 1068, NGC 4151, NGC 1386 e ESO 428-G14. Estas galáxias foram escolhidas por apresentarem uma intensa emissão de linhas coronais e com evidência da presença de *outflows* na literatura. Pela complexidade de trabalhar com cubos de dados e pela duração do mestrado, foram selecionadas só 4 galáxias. Este trabalho da continuidade ao trabalho publicado por Müller-Sánchez et al. (2011). Neste, é estudada uma amostra de 7 galáxias das quais, só NGC 1068 e NGC 4151 pertencem a nossa amostra. Na tabela 2.3 listam-se as propriedades básicas dos objetos a estudar.

Pelos objetivos deste trabalho, são usadas galáxias com dados disponíveis em outros comprimentos de onda (multi-banda), já que isto permite realizar uma análise mais completa da física associada ao gás. Na tabela 2.4 são apresentadas as linhas coronais de interesse que são analisadas em cada um dos objetos da amostra.

Tabela 2.3 - Propriedades da amostra de galáxias.

Galáxia	AR ^a (hh mm ss)	DEC ^a (deg mm ss)	z^a	M $10^7 M_{\odot}$	Log(L_{bol})	E. Esp. (pc/'')
NGC1068	02 42 40.7	-00 00 48	0.0037	1.50 ^b	44.38 ^b	76 ^h
NGC4151	12 10 32.6	+39 24 21	0.0033	3.75 ^c	43.86 ^e	64 ^e
NGC1386	03 36 46.2	-35 59 58	0.0028	1.73 ^d	42.46 ^f	75 ^f
ESO428-G14	07 16 31.2	-29 19 29	0.0056	?	42.46 ^g	92 ⁱ

^aNED (NASA/IPAC Extragalactic Database); ^bDas et al. (2006); ^cOnken et al. (2014); ^diopscience.iop.org; ^eCrenshaw et al. (2015); ^fRodríguez-Ardila et al. (2017); ^gJuán Antonio Ontivero, Comunicação privada; ^hPogge (1988); ⁱFalcke et al. (1996)

Tabela 2.4 - Linhas de alto e baixo potencial de ionização presentes na amostra de galáxias.

Linha de emissão	NGC1068	NGC4151	NGC1386	ESO428-G14
[Si VI] λ 1.96	x		x	x
[Si VII] λ 2.48	x	x		
[Ca VIII] λ 2.32	x	x	x	x
[S IX] λ 1.25	x	x		
Br γ	x	x	x	x
Pa α/β	x			
H ₂	x	x	x	

2.4 Observações

Os dados deste trabalho foram obtidos com o NIFS para as galáxias NGC1068 e NGC4151 e SINFONI para as galáxias NGC1386 e ESO 428-G14, operando juntamente com o módulo de óptica adaptativa. O procedimento de observação foi a sequência padrão Objeto-Céu-Céu-Objeto com observações de estrelas telúricas imediatamente após a observação de cada objeto. Os detalhes das configurações das observações podem ser vistos na tabela 2.5.

Nesta seção é apresentada uma descrição das observações deste estudo.

Tabela 2.5 - Observações

Galáxia	Instrumento	Programa	Filtro	Referência
NGC1068	NIFS/GEMINI	GN-2006B-C-9.	J, H, K	1
NGC4151	NIFS/GEMINI	GN-2006B-C-9	Z,J,H,K	2
NGC1386	VLT/SINFONI	ESO 86.B-0484	K	3
ESO428-G14	VLT/SINFONI	ESO 86.B-0484	K	4

(1) [Storchi-Bergmann et al. \(2012\)](#)

(2) [Storchi-Bergmann et al. \(2009\)](#)

(3) [Müller-Sánchez et al. \(2011\)](#)

(4) D. May et al. In prep.

2.4.1 NGC1068:

Para esta galáxia, os dados foram obtidos usando NIFS do Telescópio Gemini Norte em dezembro de 2006 ([MCGREGOR et al., 2003](#)). O procedimento para a redução dos dados pode ser encontrada em [Storchi-Bergmann et al. \(2012\)](#). NIFS foi usado com o sistema de óptica adaptativa ALTAIR. O núcleo compacto da galáxia NGC1068 foi usado como o objeto de referência da óptica adaptativa. As observações na banda J foram obtidas em 15 de dezembro, K_{short} , 12 de dezembro e K_{long} 13 de dezembro de 2006 (UT).

Cada conjunto de dados consistiu em múltiplas exposições de 90s que começaram com uma exposição do céu e depois, nove exposições da galáxia obtida em uma grade de 3×3 quadros centrados no núcleo da galáxia. Foi aplicado um deslocamento de quadro de 1arcsec através e perpendicular as fendas de NIFS, de modo que, o campo de visão é 5×5 arcsec² do céu, com exposição máxima de 3×3 arcsec² no centro. Esta grade de exposição foi repetida nove vezes para cada configuração. O núcleo de NGC1068 estava dentro de cada quadro, então ele era usado para registrar espacialmente as exposições. O NIFS foi ajustado para alinhar as fendas aproximadamente perpendiculares ao eixo do jato de rádio e o cone de ionização observado. Os dados usados neste trabalho já estavam calibrados por fluxo.

2.4.2 NGC4151:

Os dados deste trabalho são os mesmos utilizados por [Storchi-Bergmann et al. \(2009\)](#) e [Storchi-Bergmann et al. \(2010\)](#). Eles foram obtidos pelo telescópio Gemini norte com o NIFS ([MCGREGOR et al., 2003](#)) operando com o módulo de óptica adaptativa ALTAIR, nas noites: 12, 13 e 16 de dezembro, 2006 (UT). ALTAIR foi usada em modo de estrela guia natural com luz óptica a partir do núcleo de NGC4151 que

alimenta o sensor de onda. As observações foram feitas nas bandas espectrais Z, J, H e K. Isso resultou em uma cobertura de comprimento de onda de 0.94-1.16 μm , 1.14-1.36 μm , 1.49-1.81 μm e 1.99-2.42 μm , respectivamente. Espectros adicionais foram obtidos no ajuste longo da grade K, para atingir o intervalo de comprimento de onda 2.09-2.51 μm .

O NIFS tem um campo de visão quadrado de $\sim 3.0'' \times 3.0''$, dividido em 29 fendas, cada uma de 0.103'' de largura com uma amostra espacial de 0.042'' ao longo de cada fenda. O instrumento foi ajustado para que as fendas estejam perpendiculares ao eixo do jato de rádio. Cada conjunto de dados foi registrado com uma sequência de duas exposições de 90 s em cada uma das três posições de campo em NGC 4151, seguido de duas exposições de céu de 90s. Os cubos de dados finais contêm 2250 espectros por banda, com cada espectro correspondente a uma cobertura espacial de $6.6 \times 2.7 \text{ pc}^2$ na galáxia.

2.4.3 NGC1386:

Para este trabalho, as observações foram obtidas com o VLT com o módulo de óptica adaptativa (AO) o que permite ter uma resolução espectral de $R=4000$, na banda K (1.95-2.45) μm . A redução de dados foi realizada usando o pipeline do SINFONI fornecido pelo ESO que inclui: correção para pixels ruins, distorções geométricas de campo plano, calibração de comprimento de onda, reconstrução do cubo de dados das fatias espectrais de imagem, subtração do fundo e calibração de fluxo usando uma estrela padrão, também usada para a correção de características atmosféricas telúricas. O cubo tem uma escala de pixels de $0.05'' \times 0.05''$, como é descrito em [Rodríguez-Ardila et al. \(2017\)](#). Neste trabalho, não foi realizada a redução dos dados, estes já estavam calibrados em fluxo e com a contribuição associada à população estelar subtraída usando *penalized PixelFitting* (pPXF) de [Cappellari \(2012\)](#).

2.4.4 ESO428-G14:

Os dados aqui apresentados foram obtidos com o espectrógrafo de campo integral no NIR SINFONI assistido com o sistema de ótica adaptativa ([Bonnet et al. 2004](#); [Eisenhauer et al., 2003](#)), no *Very Large Telescope* (VLT) UT4. As observações foram realizadas no programa 086.B-0484(A), e foram tomadas nas noites de 22-12-2010 e 11-01-2011, com um tempo de exposição individual de 300 segundos. Como referência ao sistema de ótica adaptativa MACAO (Multi-Application Curvature Adaptive Optics), utilizou-se o núcleo da galáxia. A escala de pixels é de $0.05 \text{ arcsec} \times 0.1 \text{ arcsec}$, com um campo bidimensional de pixels espaciais de 64×32 (spaxels), pos-

teriormente organizado para 64x64 spaxels, resultando em um FoV de 3.2 arcsec \times 3.2 arcsec. Tomados apenas na banda K, os espectros cobrem as regiões de 1.95 a 2.45 microns, com uma resolução espectral $R \sim 5090$, correspondente a $FWHM \sim 60$ km/s. As rotinas de redução foram realizadas através do software *EsoRelfex*. Para a calibração do fluxo, utilizaram-se as estrelas B2 Hip 43842 e B3V Hip 33490 (magnitudes de 7.34 e 8.25 na banda K, respectivamente).

2.5 Características da Amostra

Nesta seção vamos descrever as características mais importantes de cada um dos objetos da amostra assim como as observações mais relevantes existentes na literatura.

2.5.1 NGC1068

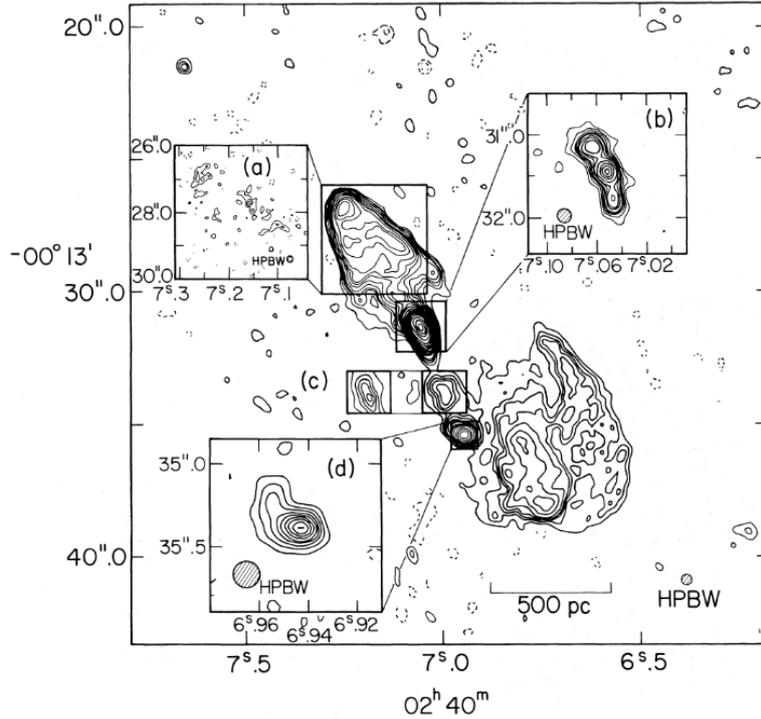
Quando Pierre Méchain descobriu este objeto em 29 de outubro de 1780, descreveu-o como uma nebulosa. Charles Messier incluiu-a como número 77 em seu catálogo em 17 de dezembro de 1780, e a classificou como um aglomerado com nebulosidade. Ela é uma das maiores galáxias do catálogo de Messier, cuja parte mais brilhante se estende por 120.000 anos-luz, mas suas extensões fracas se estendem até quase 170.000 anos-luz. Sua aparência é a de uma galáxia espiral com braços estruturados longos e que na região interior mostram uma população estelar jovem, porém, mais afastado do centro, é dominada por uma população estelar mais velha. Esta galáxia têm uma intensa formação estelar confinada a uma barra e está entre as mais brilhantes conhecidas (STORCHI-BERGMANN et al., 2001; MARTINS et al., 2010; STORCHI-BERGMANN et al., 2012).

É uma das galáxias Seyferts 2 mais próximas. Foi classificada como sendo deste tipo por Khachikian and Weedman (1974) por apresentar somente linhas de emissão estreitas no espectro da região nuclear. Esta galáxia possui 7' de diâmetro e, devido à sua grande proximidade e brilho provavelmente é uma das galáxias Seyfert 2 mais estudada até hoje.

Nesta galáxia, foi observado um jato rádio em 4.9GHz aproximadamente linear e com extensão em direção ao nordeste e ao sudoeste do núcleo e que termina em dois lóbulos (WILSON; ULVESTAD, 1983). Também, usando observações da região central da galáxia com o VLA comprovaram que a emissão em 15.0 GHz coincide com as observações do núcleo na região óptica e exibe uma estrutura de três fontes com uma extensão de $\sim 0.7''$, sendo que, a do meio está associada ao núcleo propriamente dito. Na figura 2.3 pode-se observar o mapa em 4.9 GHz junto com observações de

alta resolução observadas na frequência de 15.0GHz (WILSON; ULVESTAD, 1983). É possível observar a presença do jato, dos lóbulos e da estrutura tripla.

Figura 2.3 - Mapa em 4.9 GHz da galáxia NGC 1068 junto com observações em 15.0GHz.



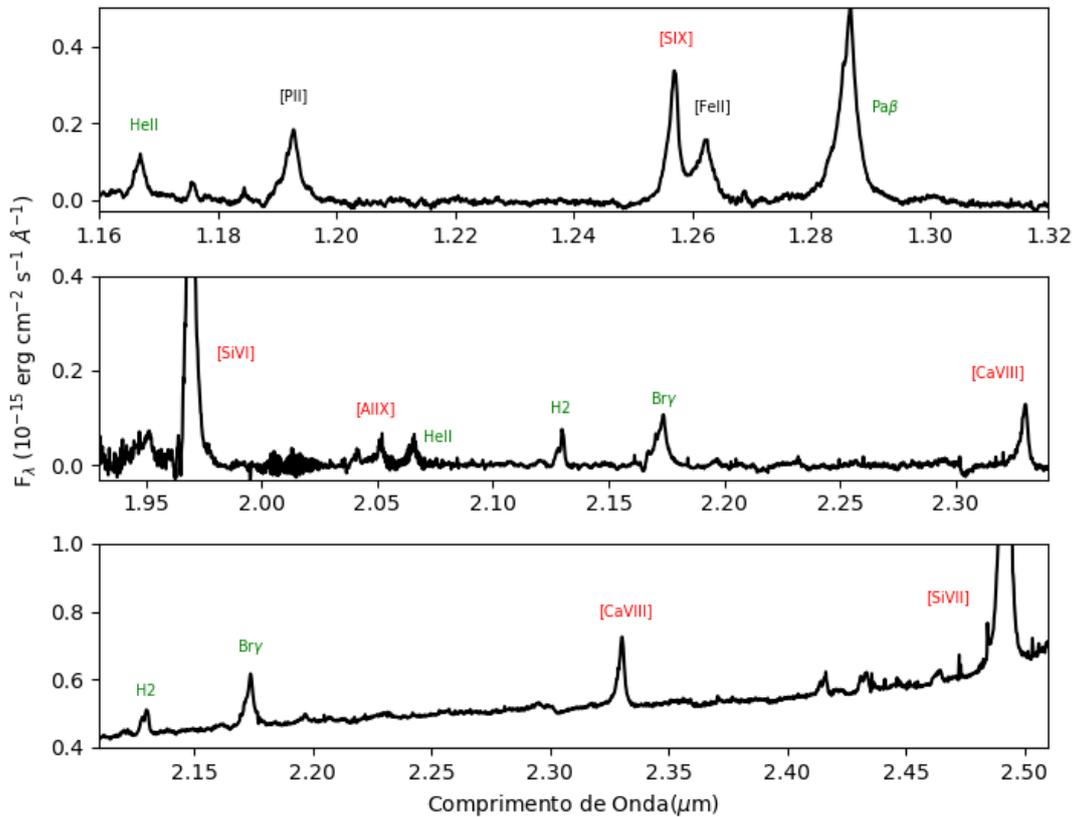
Fonte: Wilson and Ulvestad (1983)

Esta galáxia é única e peculiar por várias razões. Em primeiro lugar, algumas linhas de emissão apresentam múltiplas componentes *blueshift* ou *redshift* (CRENSHAW; KRAEMER, 2000), indicando que diversas nuvens de gás estão se movendo rapidamente para fora do núcleo. Esta característica foi descoberta por Edward A. Fath em 1908. Ele identificou seis linhas de emissão: $H\beta$, $[O II]\lambda 3727$, $[N III]\lambda 3869$ e $[O III]\lambda 4363, 4959, 5007$, isto foi confirmado depois por Vesto M. Slipher no Observatório de Lowell em um espectro de melhor qualidade em 1917 (SLIPHER, 1917).

Através da análise de imagens em $[O III]$ e $[N II] + H\alpha$, foi identificada uma estrutura em formato de cone, co-espacial com o jato em rádio, se estendendo ao nordeste (POGGE, 1988). Este resultado foi confirmado depois por Unger et al. (1992). Ele observou uma emissão fraca de $[O III]$ ao sudeste, o que provavelmente significa que o cone de ionização se localiza atrás do plano da galáxia e sofre extinção pela poeira.

Imagens de [O II] de uma região de um segundo de arco do centro da galáxia, obtidas com o HST, exibiu a complexidade da NLR do AGN (EVANS et al., 1993; MACCHETTO et al., 1994). Evidências de outflows radiais na NLR desta galáxia foram encontrados por Arribas et al. (1996) e Cecil et al. (2002). Modelos da NLR foram desenvolvidos por Crenshaw D. M. and Kraemer (2000) e mostram um *outflow* bi-cônico e nuvens em *reshift* e *blueshift* ao nordeste e sudoeste. Isto foi comprovado depois por Das et al. (2006) usando espectros do HST.

Figura 2.4 - Espectro da galáxia NGC1068 para 0.3" ao NE do núcleo.



Fonte: Produção do autor.

Analisando o espectro infravermelho de NGC 1068 é possível observar numerosas linhas de emissão: Pa β , [Fe II] λ 1.257, linhas de H₂ e as CLs [S IX] λ 1.250 (IP = 328 eV), [Si VI] λ 1.962 (166 eV) e [Si VII] λ 2.480 (IP = 205 eV). Além desses três, NGC 1068 exibe duas outras linhas de potencial de ionização alto, [Al IX] λ 2.040 (IP = 285 eV) e [Ca VIII] λ 2.321 (IP = 128 eV), que são mais fracas que as primeiras três. A

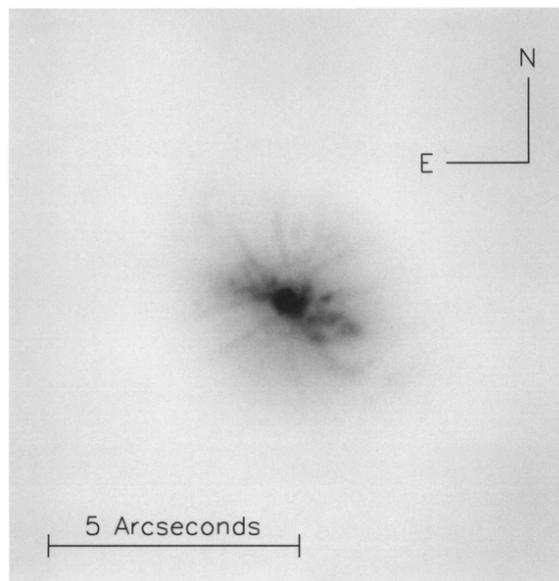
Figura 2.4 mostra os espectros das bandas J, K_l e K_s extraídas de uma região circular de 0.2"×0.2" centrada a uma distância de ~0.3" ao norte do núcleo. Em preto, são indicadas as linhas proibidas, em verde as linhas permitidas e em vermelho as linhas coronais.

2.5.2 NGC4151

Esta galáxia se encontra a uma distância de 13.3 Mpc e é um dos AGNs mais estudados por se tratar da Seyfert 1 mais próxima. Foi classificada como uma galáxia Seyfert 1.5 por [Osterbrock and Koski \(1976\)](#) pelo fato de possuir linhas permitidas largas e intensas linhas proibidas estreitas. Devido a sua proximidade, fornece uma das melhores oportunidades para estudar a interação entre um buraco negro supermassivo ativo e o gás circumnuclear da galáxia hospedeira.

[Evans et al. \(1993\)](#) usando espectroscopia com o HST analisaram as imagens de H α + [N II] λ 46548,6583 e concluíram que a emissão vem de uma fonte puntiforme nuclear não resolvida (provavelmente associada à BLR do AGN) e a emissão de [O III] λ 5007 (Ver figura) associada à NLR vem de nuvens distribuídas na forma de um bi-cone, cujo ângulo de abertura projetado é $75^\circ \pm 10^\circ$, que se estende ao longo de um ângulo de posição de $60^\circ \pm 5^\circ$.

Figura 2.5 - Imagem em [O III] λ 5007 da região central de NGC 4151 obtida com o HST.



Fonte: [Evans et al. \(1993\)](#).

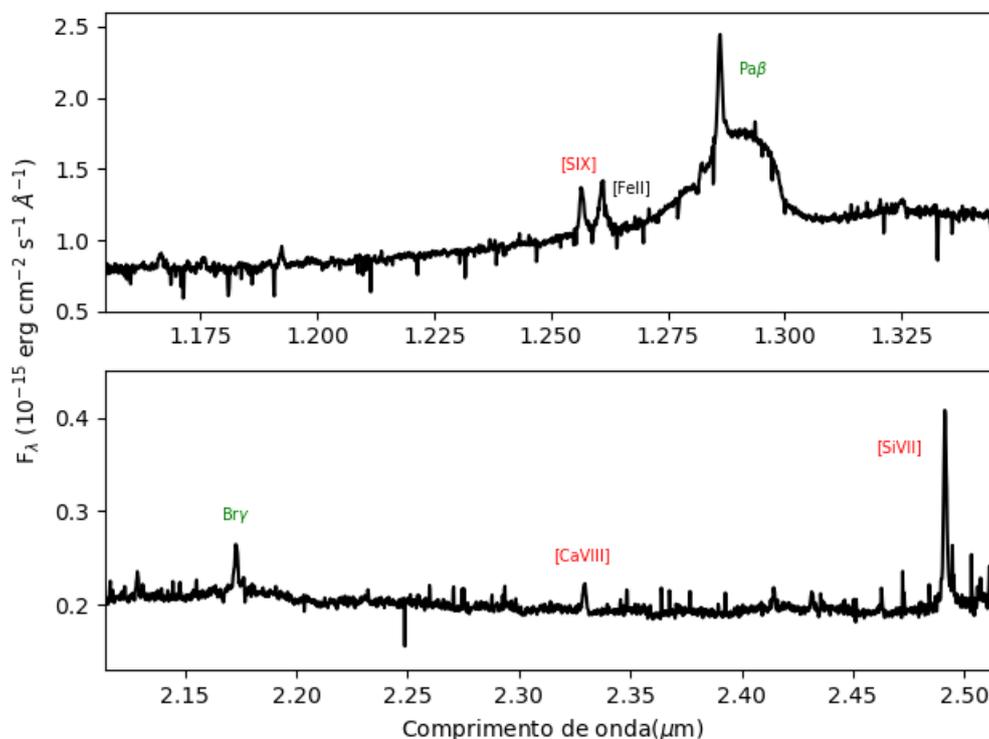
Storchi-Bergmann et al. (2009) e Storchi-Bergmann et al. (2010) analisaram cubos de dados no infravermelho próximo da região nuclear de NGC 4151, obtidos com o NIFS do telescópio Gemini-Norte. Nesse trabalho, foram identificadas três componentes cinemáticas do gás ionizado: uma emissão estendida em uma região circular ao redor do núcleo com a velocidade sistêmica da galáxia, uma componente de “*outflow*” ao longo do bi-cone e outra componente devido à interação do jato em rádio com o disco da galáxia. Isto já tinha sido observado anteriormente por Crenshaw et al. (2000b). A distribuição de bi-cone das nuvens da NLR pode ser visto na figura 2.5, através as distribuições de fluxo de [O III], que apresenta uma morfologia de bi-cone. A distribuição de fluxo de H₂, por outro lado, foi completamente diferente da do gás ionizado, sendo que, praticamente não foi detectada emissão de H₂ ao longo do bi-cone, possivelmente devido à destruição das moléculas de H₂ nessa área. Os autores propuseram que as regiões de emissão de H₂ nesse objeto demarcam um “reservatório” de gás que alimenta o AGN. É importante notar que as características gerais da cinemática observada foram reproduzidas com simulações de *outflows* em forma de bi-cones por Das et al. (2005), Crenshaw et al. (2000b) e Hutchings et al. (1999). Muitos trabalhos não encontraram correlações entre o jato em rádio e a emissão proveniente de boa parte das nuvens da NLR. No entanto, Winge et al. (1997) mostrou que o jato em rádio parece estar associado às nuvens de alta velocidade da NLR.

O espectro infravermelho da galáxia NGC 4151 mostra numerosas linhas de emissão, as linhas Pa β , Br γ , [Fe II] λ 1.257 Å, linhas de H₂ e as CLs [Si IX] λ 1.250Å, [Ca VIII] λ 2.320 Å e [Si VII] λ 2.480 Å. A Figura 2.6 mostra os espectros das bandas J e K extraídas de uma região circular de 0.2"×0.2" centrada a uma distância de \sim 0.1" ao NE do núcleo. Devido ao filtro usado na banda K (K_L), a região que contém a linha de [Si VI] não está incluída. Contudo, a linha de [Si VII] é detectada. Trabalhos prévios (MAZZALAY et al., 2013) mostram que ambas costumam ter uma distribuição espacial similar.

2.5.3 NGC1386

NGC 1386 é uma galáxia Seyfert tipo 2 espiral Sb/c (MALKAN et al., 1998) a uma distância de 15.3 Mpc da nossa galáxia, determinada a partir de flutuações de brilho de superficial por Jensen et al. (2003). Sandage and Visvanathan (1978) classificaram-na como uma galáxia de alta excitação pela alta razão de intensidade de linha [O III] λ 5007/H β . Observações em rádio de alta resolução em 8.4 GHz mostram a

Figura 2.6 - Espectro da galáxia NGC4151 a 0.1" ao NE do núcleo nas bandas J e K.



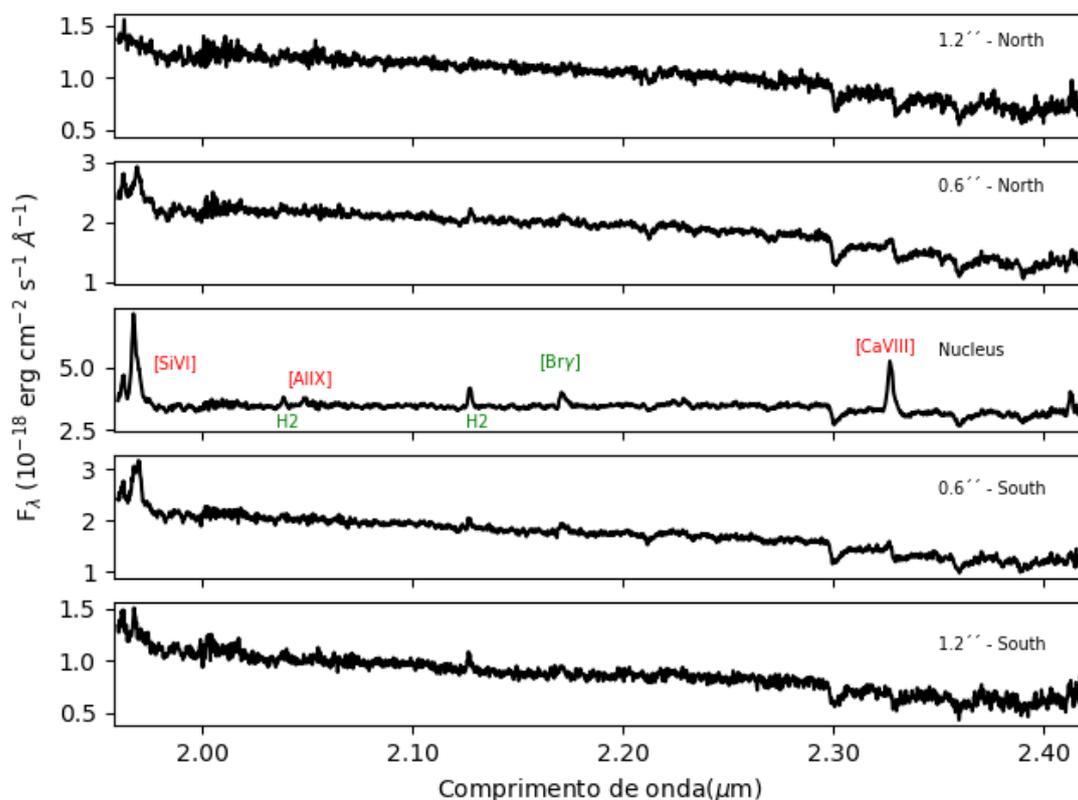
Fonte: Produção do autor.

presença de uma fonte compacta não variável confinada dentro de um segundo arco no centro e alongada para o sul no ângulo de posição $\text{PA} \sim 170\text{-}175$ graus (MUNDELL et al., 2009). O Telescópio Espacial Hubble (HST) revelou que a emissão de $[\text{O III}]$ e $\text{H}\alpha + [\text{N II}]$ apresenta uma distribuição tipo jato de gás ionizado ao longo do eixo norte-sul e estendendo-se a uma distância de $\sim 2''$ do núcleo (LENA et al., 2015).

Estudos recentes (BENNERT et al., 2006) revelaram um espectro nuclear complexo, com a presença de uma intensa componente estreita, sobreposta com uma componente mais larga, o que sugere *outflows* de alta velocidade.

O espectro na banda K de NGC 1386 da figura 2.7 foi extraído em uma região circular de $0.2'' \times 0.2''$ e apresenta as seguintes linhas de emissão: H_2 , $\text{Br}\gamma$ e as CLs $[\text{Si VI}]\lambda 1.9600 \text{ \AA}$, $[\text{Ca VIII}]\lambda 2.3200 \text{ \AA}$ e $[\text{Al IX}]\lambda 2.0400 \text{ \AA}$. Pode-se observar que, as linhas de $[\text{Al IX}]\lambda 2.0400 \text{ \AA}$, $\text{Br}\gamma$ e $[\text{Ca VIII}]\lambda 2.3200 \text{ \AA}$ possuem emissão confinada ao núcleo. A linha de $[\text{Si VI}]\lambda 1.9600 \text{ \AA}$ apresenta emissão mais estendida, podendo-se observar em até $0.6''$ ao Norte e ao sul. Como podemos ver, as linhas de emissão no NIR de NGC 1386 mostram

Figura 2.7 - Espectro da galáxia NGC1386 para diferentes distâncias do núcleo



Fonte: Produção do autor.

variações significativas ponto-a-ponto, tanto na intensidade, como em seus perfis, o que sugere uma cinemática do gás complexa.

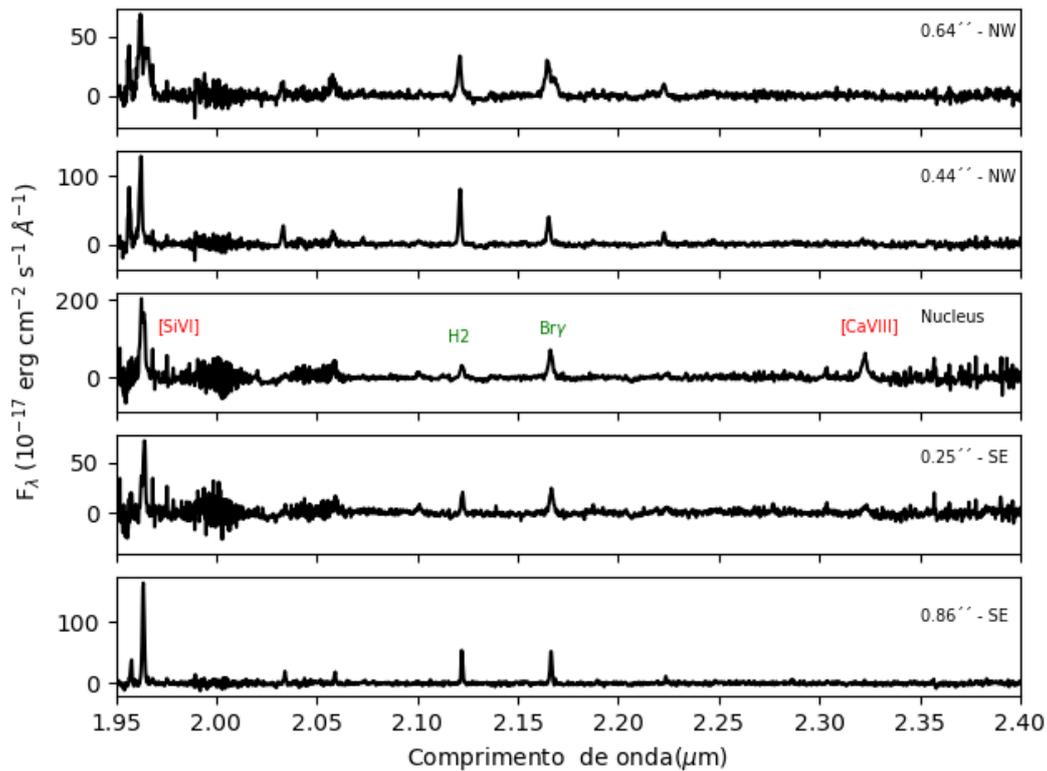
2.5.4 ESO428-G14

Foi classificada como uma galáxia seyfert 2 por Bergvall et al. (1986). Usando imagens de banda estreita obtidas com o HST nos filtros [O III] e $H\alpha + [N II]$ foi observado que o gás ionizado tem emissão estendida e alinhada com o jato rádio com emissão mais intensa na direção NW (FALCKE et al., 1996; FALCKE et al., 1998). Além disso, foi mostrado que estas linhas apresentam uma estrutura de duplo cone com maior intensidade na direção SE.

Ulvestad and Wilson (1989) e Falcke et al. (1996) observaram, usando mapas da emissão rádio em alta resolução obtidos com o VLA, que o jato rádio é assimétrico

na direção SE e NW. O lado NW é menos estendido e termina em um “*hot spot*” brilhante a 0.75” do núcleo, enquanto no lado SE a emissão é mais fraca e o jato curva-se para o norte.

Figura 2.8 - Espectro da galáxia ESO428-G14 para diferentes distâncias do núcleo



Fonte: Produção do autor.

Podemos observar no espectro infravermelho desta galáxia que a linha de H₂ mostra emissão mais forte para regiões fora do núcleo, oposto à emissão observada na linha [Ca VIII], a qual está confinada ao núcleo da galáxia. A linha de Brγ pode ser observada dentro e fora do núcleo. No caso da CL [Si VI], pode-se observar uma emissão intensa dentro e fora do núcleo com variações significativas na forma do perfil e na intensidade, o que pode-se traduzir em um gás altamente complexo se movendo a diferentes velocidades e em diferentes direções.

3 METODOLOGIA

A fim de pesquisar os fenômenos físicos que acontecem nos parseis mais internos das galáxias observadas, construímos mapas bidimensionais para analisar a morfologia e cinemática do gás, medimos as razões de algumas linhas de emissão e foram desenvolvidas simulações com o software Cloudy. Todas essas metodologias estão descritas mais detalhadamente nas seções a seguir.

3.1 QFitsView

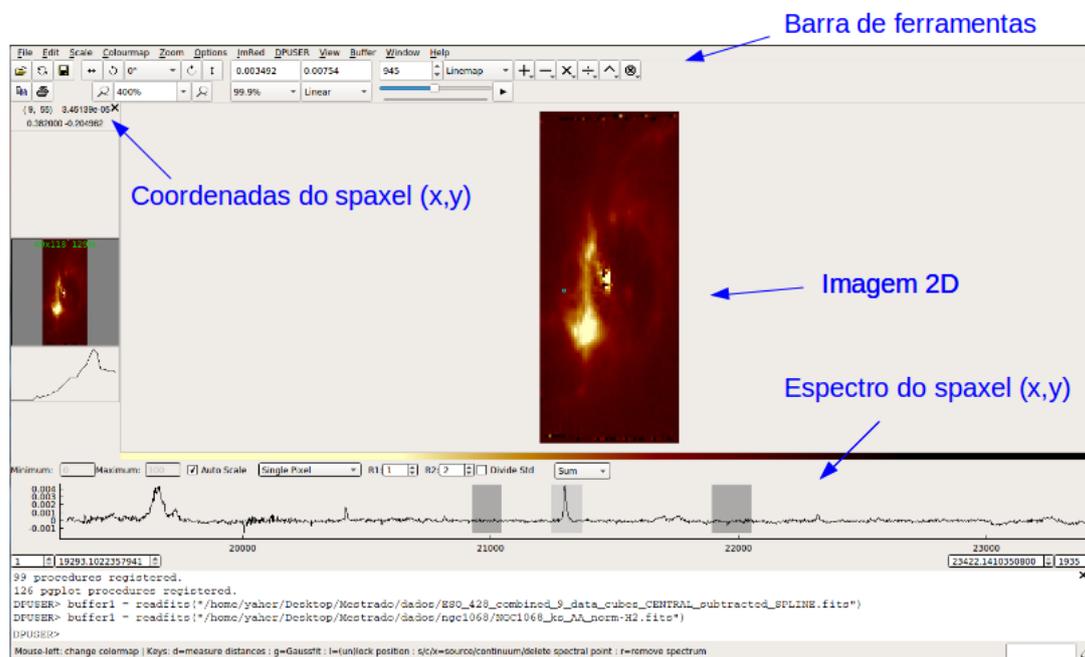
É uma ferramenta que permite manipular e visualizar arquivos FITS desenvolvida por Thomas Ott e que encontra-se disponível online (www.mpe.mpg.de/ott/QFitsView/). Este software permite exibir arquivos de um, duas, e três dimensões. Possibilita a observação do espectro contido ao longo do eixo de dispersão (eixo z) em cada spaxel (x,y) de um cubo de dados. Além disso, permite transformar o cubo de dados em uma imagem 2D (mapas de linhas de emissão) e realizar a subtração do contínuo para cada imagem. Neste trabalho, o Qfitsview será usado para a criação dos mapas e as tomografias das linhas de emissão. Sua janela principal (ver Fig. 3.1) consiste nas seguintes áreas:

- No topo: uma barra de ferramentas que fornece acesso rápido a ações comumente usadas
- À esquerda: informação do pixel sob o cursor (coordenadas de pixels, valor de pixel e coordenadas de WCS), zoom e uma visão geral da imagem
- Na parte inferior: no caso de um cubo de dados, o espectro sob o cursor
- A parte central da janela mostra a imagem para um dado intervalo de comprimento de onda.

QfitsView possui três modos de operação, dependendo do tipo de dados que está sendo exibido. No caso de espectros 1D, os dados são mostrados em um gráfico x-y. Imagens 2D são mostradas na janela principal. Para cubos de dados, duas dimensões são mostradas como um gráfico x-y e na parte inferior da imagem a informação do espectro.

A forma como o espectro é calculado pode ser: um único spaxel, abertura circular ou abertura circular-anular. Na opção, “um único spaxel” o espectro ao longo da posição do cursor é plotado. Circular significa que o espectro é a soma dos espectros

Figura 3.1 - Interface do QFitsView



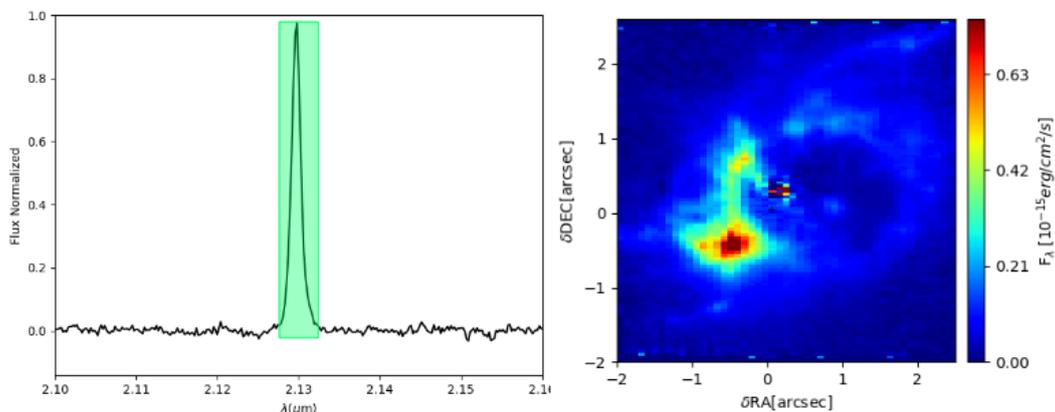
Fonte: Produção do autor.

centrados em um círculo com raio $R1$ e circular-anular significa que, a partir do espectro circular, o espectro médio de um anel com $R1 < r < R2$ é subtraído.

Usando este software foram realizados os mapas de emissão das linhas de interesse com a intenção de estudar a morfologia do gás. Na figura 3.2 representamos esquematicamente a metodologia adotada para construir os mapas das linhas de emissão. No painel esquerdo desta figura é mostrado o perfil de uma dada linha de emissão (neste caso H_2) da galáxia NGC1068. No painel direito está exposta a distribuição de fluxo resultante após integrar a região marcada com cor verde no perfil observado.

Além disso, Qfitsview permite elaborar tomografias das linhas de emissão. Esta técnica é utilizada para estudar a cinemática do gás, já que a alta resolução espectral dos instrumentos usados neste trabalho nos permitiu “fatiar” as linhas de emissão em pequenos intervalos ou *bins* de velocidades ao longo dos perfis observados. Na figura 3.3 pode-se observar uma representação esquemática da metodologia adotada para obter os tomogramas das linhas de emissão. No painel superior mostramos o perfil da linha de emissão (neste caso $[Si\ VI]\lambda 1.96\mu m$) obtida na posição identificada com a letra A e B na galáxia ESO428-G14. No painel inferior é mostrado os mapas

Figura 3.2 - Esquema dos mapas das linhas de emissão desenhados com QFitsView



Fonte: Produção do autor.

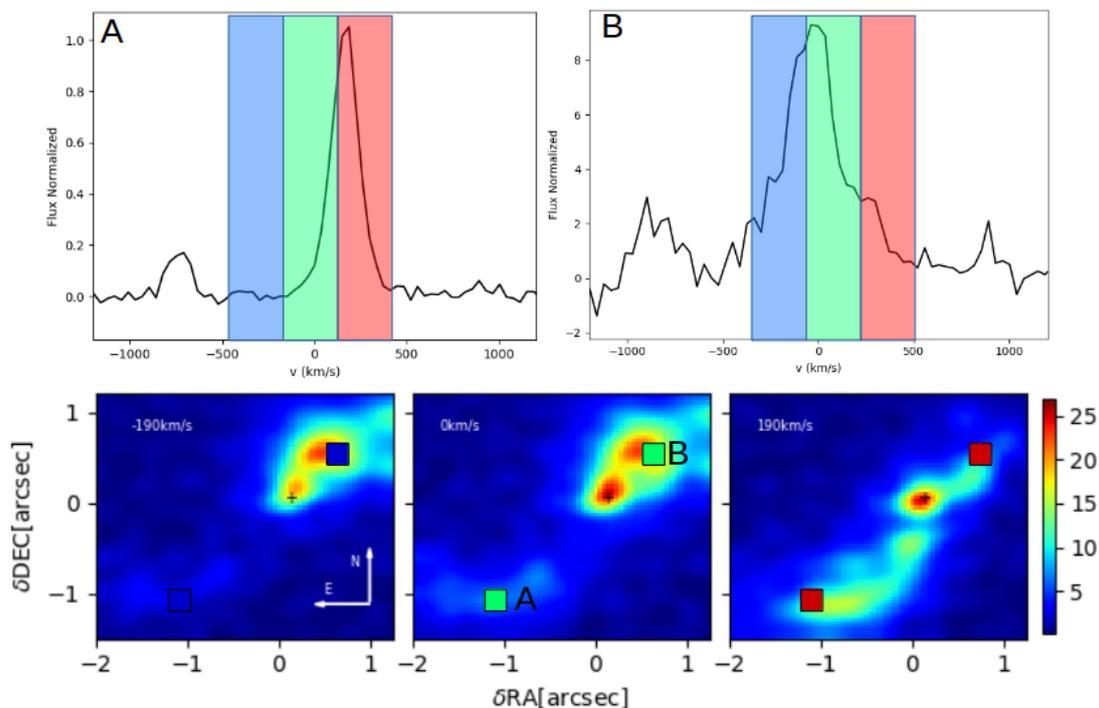
de fluxo integrados para velocidades deslocadas para o azul centradas em 190 km/s, velocidade zero e velocidades deslocadas para o vermelho centradas em 190 km/s. A velocidade zero é a velocidade sistêmica da galáxia. Neste caso, pode-se observar uma componente do gás movendo-se a 190km/s para o vermelho na posição A e uma componente do gás deslocada para o azul à 190 km/s no ponto sinalizado com a letra B.

Depois de elaborar os mapas de emissão com esta ferramenta, os mapas passaram, por um processo de filtragem de ruído e calibração com códigos desenvolvidos em python. Também foi necessário desenvolver códigos para manipular os espectros extraídos usando Qfitsview (apresentados no capítulo 2). A análise das linhas de emissão, foi realizada com outro software, chamado LINER, que será discutido na próxima seção.

3.2 LINER

A análise das linhas de emissão de um AGN pode ser realizado pela descrição dos perfis das linhas de emissão observadas. Estas podem ser representadas através de funções analíticas: perfil logarítmico, de Voigt, lorentziano, gaussianos ou exponenciais. Por exemplo, se for assumido que a razão principal do alargamento das linhas for o movimento aleatório e turbulento do gás, uma função que bem se aplicaria para descrever os perfis de tais linhas seria uma gaussiana (EVANS, 1988). Para auxiliar na parametrização dos perfis, podem-se ajustar componentes adicionais da mesma função simétrica ao perfil da linha. Uma forma de interpretar o ajuste de múltiplas

Figura 3.3 - Representação esquemática da metodologia para realizar as tomografias das linhas de emissão



Fonte: Produção do autor.

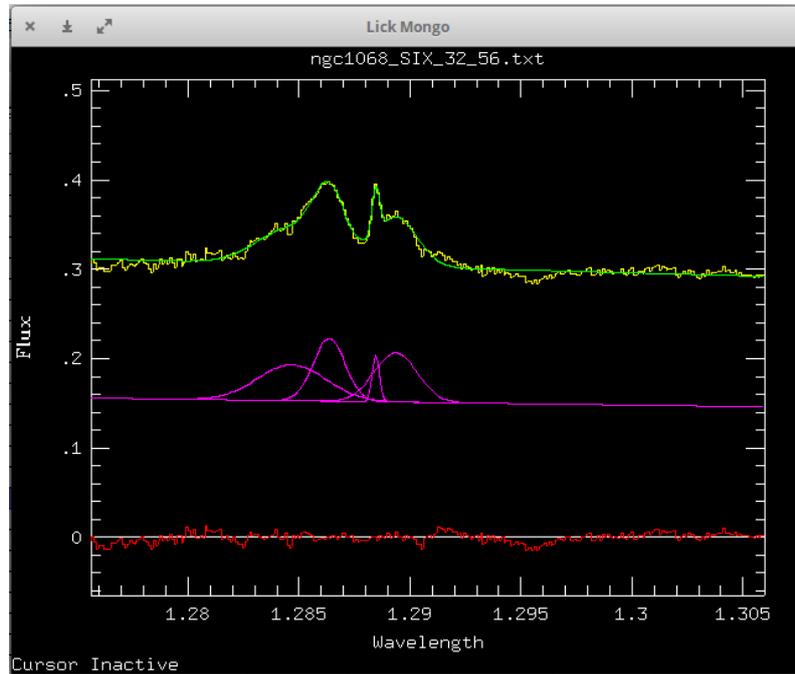
gaussianas a um perfil de linha é atribuir a cada componente uma origem (espacial e/ou cinemática) diferente dentro da região emissora integrada.

Neste trabalho, realizamos a análise dos perfis de linhas em emissão, com destaque para as CLs, adotando como parametrização dos perfis as funções Gaussianas usando o código LINER (POGGE; OWEN, 1993). Este código permite ajustar até 8 Gaussianas ao perfil dado. Este software proporciona informação do fluxo, FWHM, comprimento de onda central e largura equivalente.

Na figura 3.4 pode-se observar um exemplo de ajuste de diferentes gaussianas a uma linha de emissão. Pode-se ver em cor verde o ajuste total, em roxo cada uma das componentes ajustadas e em vermelho o resíduo. Este software proporciona o valor do fluxo integrado, o FWHM de cada uma das componente ajustadas e o RMS.

A fim de investigar os mecanismos de excitação das linhas coronais, foram extraídos espectros a diferentes distâncias do núcleo e em diferentes direções. Posteriormente medidos os fluxos integrados das componentes das linhas coronais mais proeminentes

Figura 3.4 - Interface do software LINER.



Fonte: Produção do autor.

e as linhas de baixo potencial de ionização ($\text{Br}\gamma$ ou $\text{Pa}\beta$ no caso de serem detectadas) para depois, ser comparadas com modelos de fotoionização realizados com o Cloudy.

3.3 Cloudy

Pela complexidade do problema ligado à fotoionização de nuvens no meio interestelar, é crescente a utilização de modelos numéricos de fotoionização no estudo de objetos astrofísicos. Realizando os cálculos envolvidos na transferência radiativa, na interação por diversos processos da radiação com a matéria e utilizando dados atômicos, estes códigos fornecem uma descrição dos processos físicos envolvidos na transferência ou emissão de radiação.

De modo geral, os códigos de fotoionização começam com três hipóteses básicas:

- Estado estacionário do sistema
- Equilíbrio de ionização
- Equilíbrio térmico

A hipótese de estado estacionário implica desprezar processos dinâmicos que poderiam ocorrer na nuvem. Por conseguinte, através das hipóteses de equilíbrio térmico e de ionização, pode-se determinar a temperatura e o grau de ionização em cada ponto do objeto.

3.3.1 Equilíbrio de ionização

O equilíbrio de ionização é fundamentado sobre o balanço entre a fotoionização e a recombinação de íons em uma nuvem.

$$\text{Recombinação} = \text{Ionização}$$

Entre os processos físicos relacionados ao equilíbrio de ionização podemos encontrar:

- Ionização:
 - Fotoionização
 - Choques
 - Intercâmbio de carga
- Recombinação:
 - Recombinação radiativa
 - Recombinação eletrônica
 - Intercâmbio de carga

Pelo objetivo desse trabalho, a discussão será centralizada na ionização por fotoionização. A equação de equilíbrio de fotoionização vem dada pela seguinte relação:

$$n_e n_p \alpha_B(T) = n(H^0) \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_\nu}{h\nu} a_\nu d\nu = n(H^0) \phi(H) \bar{a} \quad [cm^{-3} s^{-1}]. \quad (3.1)$$

A qual, $\alpha_B(T)$ é o coeficiente de recombinação do caso B (Todo os ftons Ly α escapam da nuvem de gás). a_ν é a seção eficaz de choque para uma frequência ν , J é a intensidade média e \bar{a} é a seção de fotoionização média. O fluxo de fótons ionizantes é dado por:

$$\phi(H) = \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{4\pi J_\nu}{h\nu} d\nu. \quad (3.2)$$

Por tanto, o parâmetro de ionização (definido como a razão adimensional da densidade de fótons ionizantes com a densidade de elétrons) representa a estrutura de ionização em um ponto dado do objeto, e é dado pela seguinte expressão:

$$U \equiv \frac{\phi(H)}{cn_e} = \frac{Q(H^0)}{4\pi r^2 nc}. \quad (3.3)$$

A equação 3.3, em equilíbrio de ionização, pode ser reescrita por:

$$U = \frac{n_p}{cn(H^0)} \frac{\alpha_B}{\bar{a}}. \quad (3.4)$$

E assim por diante, observamos que, para uma distância dada da fonte ionizante, a ionização diminui quando a densidade aumenta. Também, é importante ressaltar que este parâmetro é proporcional ao grau de ionização, daí a importância de sua determinação.

3.3.2 Equilíbrio térmico

A temperatura em cada ponto da nuvem é dada pelo equilíbrio entre o aquecimento e o resfriamento devido à recombinação e radiação emitida pela nuvem.

$$\text{Aquecimento} = \text{Resfriamento}$$

Os processos físicos relacionados a estes fenômenos físicos são:

- Aquecimento:
 - Fotoionização
 - Choques
- Resfriamento:
 - Radiação *free-free*
 - Radiação *free-bound* (recombinação)
 - Radiação *bound-bound* (Excitação colisional seguida por de-excitação radiativa)

O equilíbrio térmico pode-se resumir na seguinte equação:

$$G - L_R = L_{ff} + L_C \quad (3.5)$$

Na qual G é a taxa de aquecimento, L_R é a taxa de resfriamento, L_{ff} as transições livre-livre e L_C a radiação emitida pelas excitações colisionais.

O aquecimento do gás é principalmente por fotoionização. Em equilíbrio de ionização, as fotoionizações são compensadas pelas recombinações e a diferença entre a energia média ganha e a perdida é o ganho de energia do gás. Esta quantidade está representada por $G - L_R$ na equação 3.5 e é chamada “taxa de aquecimento efetivo”. Representa a energia ganha no processo de fotoionização, com a recombinação subtraída.

No entanto, em condições de equilíbrio térmico, o ganho de energia é compensado pelo esfriamento radiativo procedente das excitações colisionais dos níveis de energia mais baixos de íons comuns (tais como O^+ e N^+). Estas excitações finalizam com a emissão de fótons que podem escapar da nebulosa. Independentemente de sua baixa abundância com respeito a H e He, estes íons de elementos mais pesados contribuem significativamente ao resfriamento da nuvem, pelo fato de que existirem níveis de energia com potenciais de excitação da ordem de kT_e , ao contrário do H e He que possuem potenciais de excitação maior. Portanto, uma maior abundância de metais faz com que o resfriamento ocorra de forma mais eficiente.

As linhas de emissão são o produto de fótons emitidos como consequência de transições radiativas de elétrons que decaem a níveis de energia mais baixos de um átomo. As características das linhas de emissão se definem pelos mecanismos que produzem, composição química do gás, forma do contínuo ionizante e a distribuição do gás.

Trabalhos prévios sugerem que as intensas linhas de emissão observadas nos espectros de AGNs são inteiramente produzidas pela fotoionização pela fonte central (CECIL et al., 2002; MAZZALAY et al., 2010). Mas, poderia existir outro mecanismo físico contribuindo nessa produção, tal como choques entres nuvens que se movem a altas velocidades. Portanto, o gás encontra-se longe do equilíbrio térmico local e o nível de ionização não é dado pela equação de Saha e de Boltzmann respectivamente, pelo contrário, é dado pelo equilíbrio entre os processos de ionização e recombinação do gás. A dificuldade para resolver estas equações é solucionada com códigos numéricos.

Existem distintos códigos de fotoionização disponíveis. Optou-se neste projeto por usar a versão c17.00 do código de fotoionização Cloudy (FERLAND et al., 2017), que tem sido extensamente utilizado nas últimas décadas e que está em contínuo desenvolvimento. Ele divide a região de interesse em diferentes zonas em que as condições físicas são aproximadamente constantes. O nível de ionização é calculado levando-se em conta todos os processos de ionização colisional e transferência de cargas.

Cloudy é um código unidimensional e encontra-se disponível online. Os dados atômicos e documentação encontram-se disponíveis em www.nublado.org. Também dispõe de um grupo “*Yahoo discussion board*” que permite realizar perguntas, sugestões e reportar diversos problemas que o código pode apresentar.

Os parâmetros de entrada do código são:

- Luminosidade da fonte central
- Espectro da fonte central
- Composição química da nuvem
- Densidade da nuvem
- Distância da nuvem à fonte central

Com estes parâmetros, é possível determinar o grau de ionização do gás, a densidade de partículas, a temperatura cinemática do gás e as populações dos níveis de energia dos átomos e íons. Todos esses parâmetros obtidos permitem que o espectro resultante seja reproduzido.

No caso dos cubos de dados das galáxias da amostra, as simulações realizadas com Cloudy foram elaboradas na tentativa de reproduzir várias razões de linhas desses objetos. O principal objetivo da utilização do Cloudy nos espectros desses objetos é determinar a fonte de ionização mais provável existente em cada um deles. Neste trabalho, para fazer os modelos de fotoionização foi usado o contínuo ionizante proposto por Mathews and Ferland (1987) que é o contínuo típico de um AGN “radio-quiet” e que consiste em múltiplas leis de potencia com a forma $f \propto \nu^\alpha$ onde α vai tomar diferentes valores dependendo do comprimento de onda. As luminosidades usadas são mostradas na tabela 2.3 as densidades usadas são $n_H=100, 500, 10^3, 10^4$ e

10^5 cm^{-3} com distâncias variando desde zero até ~ 270 pc do núcleo. As abundâncias usadas encontram-se disponíveis em [Grevesse et al. \(2011\)](#).

Para manipular o código de fotoionização, foi utilizada a biblioteca pyCloudy ([MORISSET, 2013](#)). Esta biblioteca é uma ferramenta que permite:

- Definir o arquivo de entrada para Cloudy de forma rápida e fácil.
- Ler os arquivos de saída de Cloudy e manipular os dados
- Construir modelos pseudo-3D, o que significa: executar um conjunto de modelos alterando parâmetros, ler as saídas e interpolar os resultados em um cubo 3D.

Neste trabalho, pyCloudy foi usado para escrever os arquivos de entrada do código e ler de maneira mais rápida os arquivos de saída.

4 MORFOLOGIA E CINEMÁTICA DO GÁS

Uma das grandes vantagens dos dados IFU com respeito aos espectros de fenda longa usados comumente é que possibilitam obter informação espectral em regiões espaciais bidimensionais de uns poucos segundos de arco. Além disso, a boa resolução espacial fornecida pelo SINFONI e pelo NIFS ($\sim 0.1''$) permite realizar mapas bidimensionais e tomografias das CLs mais intensas (ie. [Si VI] e [Si VII]) e outras linhas de interesse (ie. $\text{Br}\gamma$, $[\text{Fe II}]\lambda 1.2570 \text{ \AA}$ e $\text{H}_2\lambda 2.1218 \text{ \AA}$). Desse modo, é possível comparar o gás em diferentes estados de ionização para obter informação sobre a origem e as propriedades físicas da NLR.

Os mapas de distribuição de fluxo que serão apresentados ao longo deste capítulo foram criados integrando o fluxo de cada uma das linhas em emissão. Estes intervalos foram determinados por inspeção visual ao longo do campo de visão nos cubos de dados.

As tomografias foram realizadas integrando o fluxo em intervalos de velocidade ($\delta v = c \times \delta\lambda/\lambda$) ao longo dos perfis das linhas de emissão, obtendo mapas bidimensionais de emissão do gás com diferentes velocidades, como foi explicado no capítulo 3. Os intervalos de velocidade mudam de linha a linha, dependendo da resolução espacial e espectral e o comprimento de onda estudado. A análise da morfologia e cinemática do gás no núcleo e na região circumnuclear das galáxias da amostra é discutido a seguir.

4.1 NGC 1068

4.1.1 Morfologia do gás

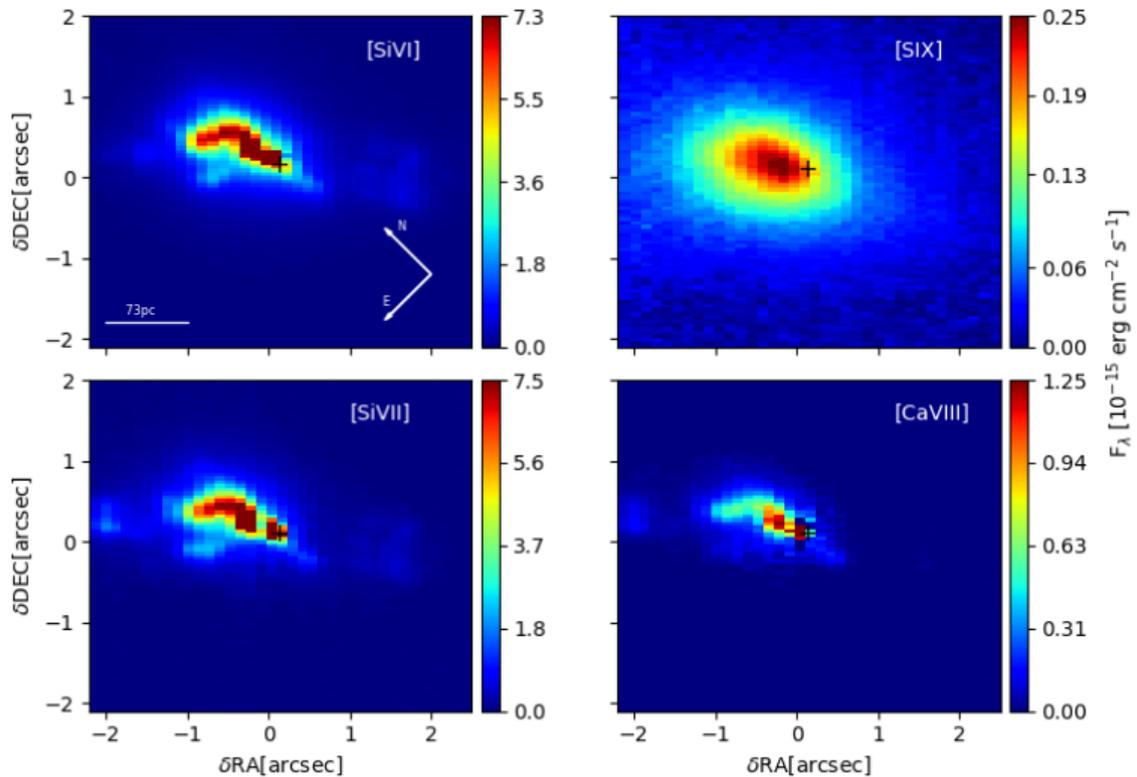
Nas figuras 4.1 e 4.2 apresentamos os mapas bidimensionais da emissão de CLs e linhas de baixo potencial de ionização observados nos $5'' \times 5''$ centrais da galáxia NGC 1068 nas bandas J e K. As barras de cores indicam o fluxo integrado em unidades $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. A orientação e escala espacial é a mesma em todas as figuras. A posição do AGN em cada imagem é sinalizada com uma cruz preta e foi determinada pela localização do máximo do contínuo na banda K.

Observamos que todas as CLs detectadas ([S IX], [Si VI], [Si VII] e [Ca VIII]) apresentam uma morfologia similar, com uma extensão de até $\sim 2''$ ($\sim 146 \text{ pc}$) na direção NE. A distribuição do gás vista na direção SW é diferente. As CLs mostram uma abrupta queda na emissão. A linha de [S IX] é observada até $0.5''$ (37 pc) na direção SW do núcleo. Para [Si VI] e [Si VII] vemos um pico de emissão em $\sim 1.5''$ na mesma

direção. É importante mencionar que o desempenho do sistema de óptica adaptativa do Gemini Norte na banda J é menor que aquele na banda K. Portanto a resolução angular obtida na linha de [S IX] é inferior ($\sim 0.25''$).

É interessante comparar a emissão de CLs com a emissão em outros comprimentos de onda. Como foi visto no capítulo 2, esta galáxia possui um jato rádio que pode ter um papel importante na estrutura de ionização e cinemática da NLR. Com este objetivo, confrontamos a distribuição de fluxo de [Si VI] com o contínuo em rádio e linhas de baixa ionização no óptico e no infravermelho.

Figura 4.1 - Mapa das linhas de alto potencial de ionização para a galáxia NGC 1068.

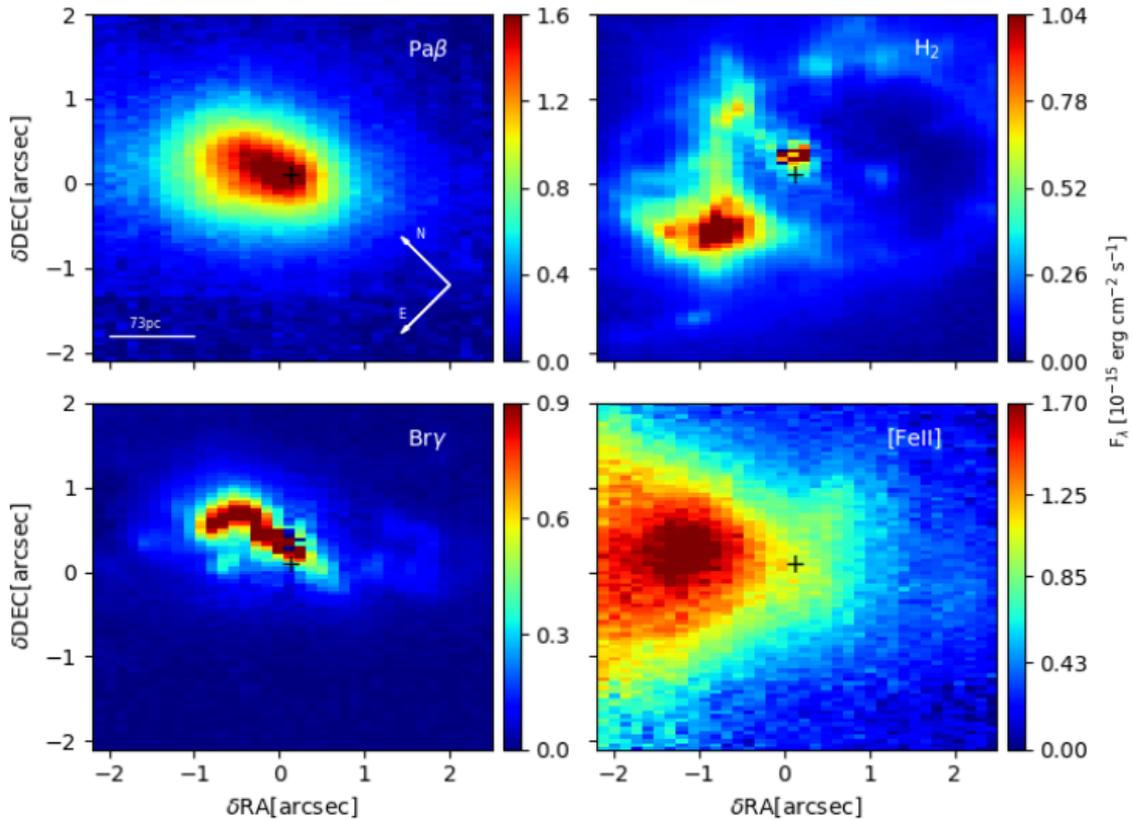


Fonte: Produção do autor.

Nos mapas de emissão das linhas de baixo potencial de ionização mostrados na figura 4.2, observamos que o gás emissor de $\text{Br}\gamma$ apresenta uma extensão de até $1''$ (73 pc) ao NE e SW. No caso de [Fe II], a emissão se estende até $2''$ (146 pc) do núcleo na direção NE. Constatamos que o gás que emite esta linha traça de forma clara o cone de ionização nessa direção. Já no SW o gás é menos estendido, sendo

observado até $1''$ (73 pc). Para $\text{Pa}\beta$, detectamos emissão até $1.8''$ (131 pc) ao NE e $1''$ (73 pc) no sentido SW, o que é compatível com o observado em $\text{Br}\gamma$. Podemos ver que as regiões emissoras de CLs em NGC 1068 são assimétricas e alongadas na direção NE-SW. Esta característica também é observada nas linhas de $\text{Br}\gamma$ e $\text{Pa}\beta$.

Figura 4.2 - Mapa das linhas de baixo potencial de ionização para a galáxia NGC 1068.

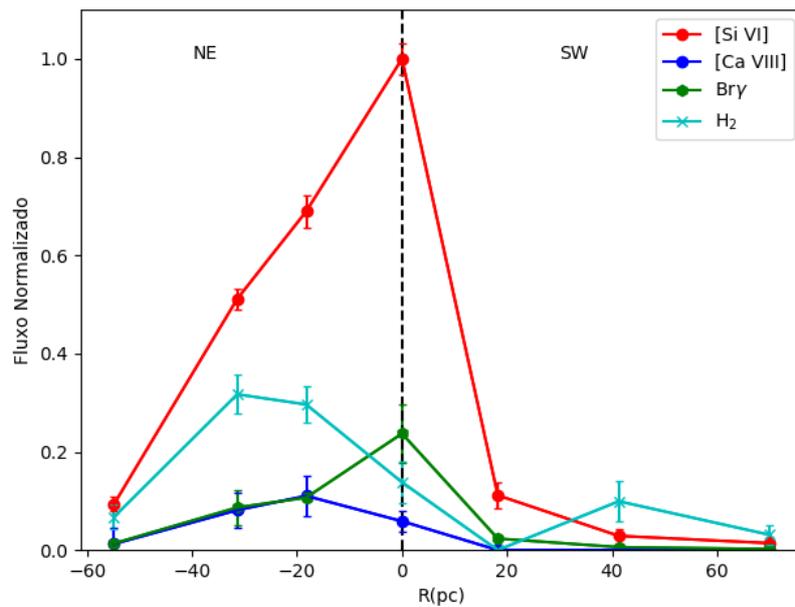


Fonte: Produção do autor.

O gás molecular, representado pela linha de $\text{H}_2\lambda 2.12\mu\text{m}$, exibe uma morfologia diferente da observada nas outras linhas já estudadas. Vemos uma estrutura anelada ao redor do centro com uma região mais intensa a $\sim 0.7''$ do núcleo na direção SE. Neste trabalho só é apresentada a emissão de $\text{H}_2\lambda 2.12\mu\text{m}$ mas as outras linhas de H_2 detectadas na banda K mostram uma morfologia similar. Esta distribuição do gás já foi previamente observada por Galliano and Alloin (2002). O diagrama posição-velocidade construído para o gás molecular é compatível com a hipótese de um disco molecular em rotação. Os mapas observados em este trabalho são consistentes em tamanho, orientação e forma com os reportados por Mazzalay et al. (2013).

Os resultados descritos acima podem ser constatados a partir da distribuição de brilho das diferentes linhas. Para isso, foi traçada uma pseudo-fenda na direção NE-SW e extraídos espectros com aberturas de $0.2 \times 0.2 \text{ arcsec}^2$ ao longo da fenda. O resultado para as diferentes linhas se encontra na figura 4.3.

Figura 4.3 - Perfil de brilho para linhas de alto e baixo potencial de ionização na galáxia NGC 1068

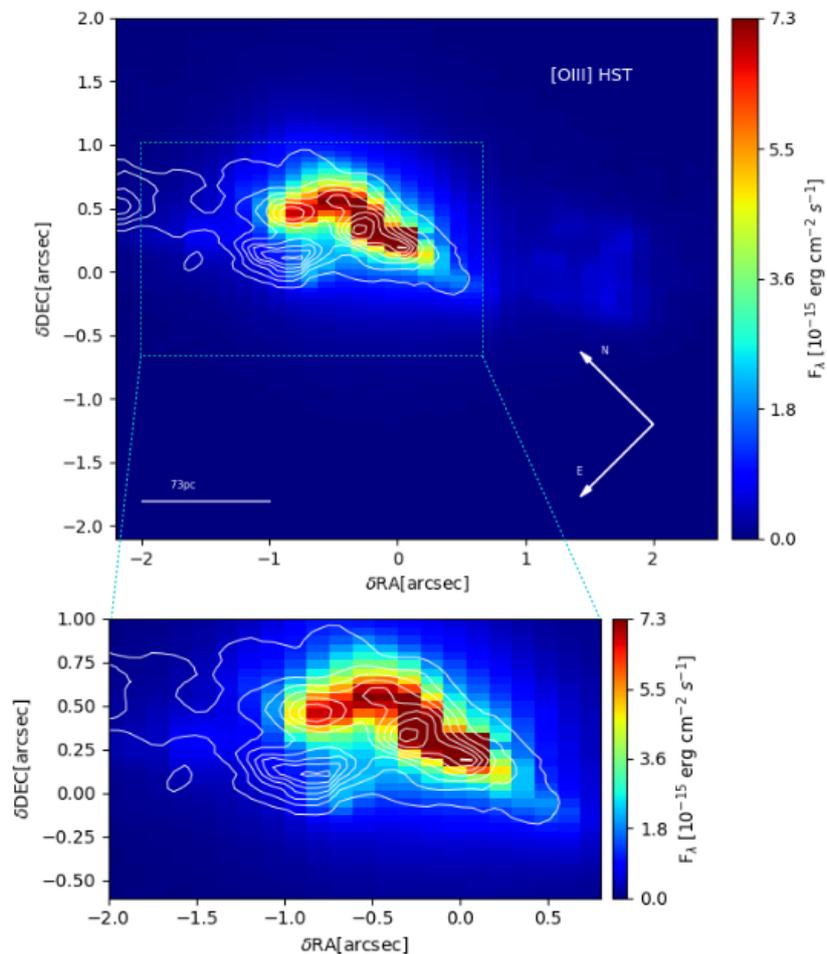


Fonte: Produção do autor.

Observamos que o gás tem uma distribuição altamente irregular, independente do estado de ionização deste, com máximo em emissão no núcleo. Porém, vemos que na linha de [Ca VIII] o pico de emissão encontra-se em 20 pc ao NE do núcleo. Na banda K, o espectro é dominado pela linha de [Si VI], que atinge uma intensidade até 4 vezes maior que as outras linhas em emissão.

Comparando a emissão de [Si VI] com a de [O III] observada pelo HST (SCHMITT et al., 2003) (ver figura 4.4), vemos que são co-espaciais. Este resultado pode aplicar-se também para as outras CLs estudadas em este trabalho. No caso de [Si VI] e [Si VII] é observado um pico em emissão em $\sim 1.2''$ (88 pc) na direção SW que não é acompanhado pela emissão de [O III]. Este resultado se deve ao fato de que esta galáxia apresenta uma forte extinção nesta direção (KRAEMER; CRENSHAW, 2000; MASON et al., 2006; GEBALLE et al., 2009).

Figura 4.4 - Mapa da linha [Si VI] com os contornos de [O III] observados com o HST na galáxia NGC 1068.



Fonte: Produção do autor.

É importante mencionar que a emissão de [O III] tem sido interpretada como evidência da interação entre o jato rádio e as nuvens emisoras de linhas (MACCHETTO et al., 1994). No cenário proposto, o jato limpa o meio interestelar, empurrando lateralmente o gás, comprimindo-o por meio de choques e produzindo a emissão estendida observada. Pela semelhança entre a morfologia de [O III] e as CLs, a interpretação anterior pode-se estender para o gás emissor de alta ionização.

A correspondência entre estas emissões juntamente com a cinemática similar exibida pelo gás de alta e baixa ionização (MAZZALAY et al., 2010) sugere que as CLs e o [O III] são produzidos nas mesmas regiões, provavelmente por uma mistura de nuvens de alta e baixa densidade. Se assumirmos esse cenário e usando que a densidade crítica

de $[\text{O III}]\lambda 5007$ é $n_e = 7 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ podemos concluir que as regiões emissoras de linhas coronais têm densidades menores a este valor. Este resultado é consistente com o intervalo de densidades reportado por [Ferguson et al. \(1997\)](#) para a região de linhas coronais.

A emissão observada de $[\text{O III}]$ e das CLs encontra-se na mesma direção do jato em 6 cm observado com o VLA por [Gallimore et al. \(1996\)](#). Isto sugere que o jato rádio desempenha um papel importante na formação de CLs.

4.1.2 Cinemática do gás

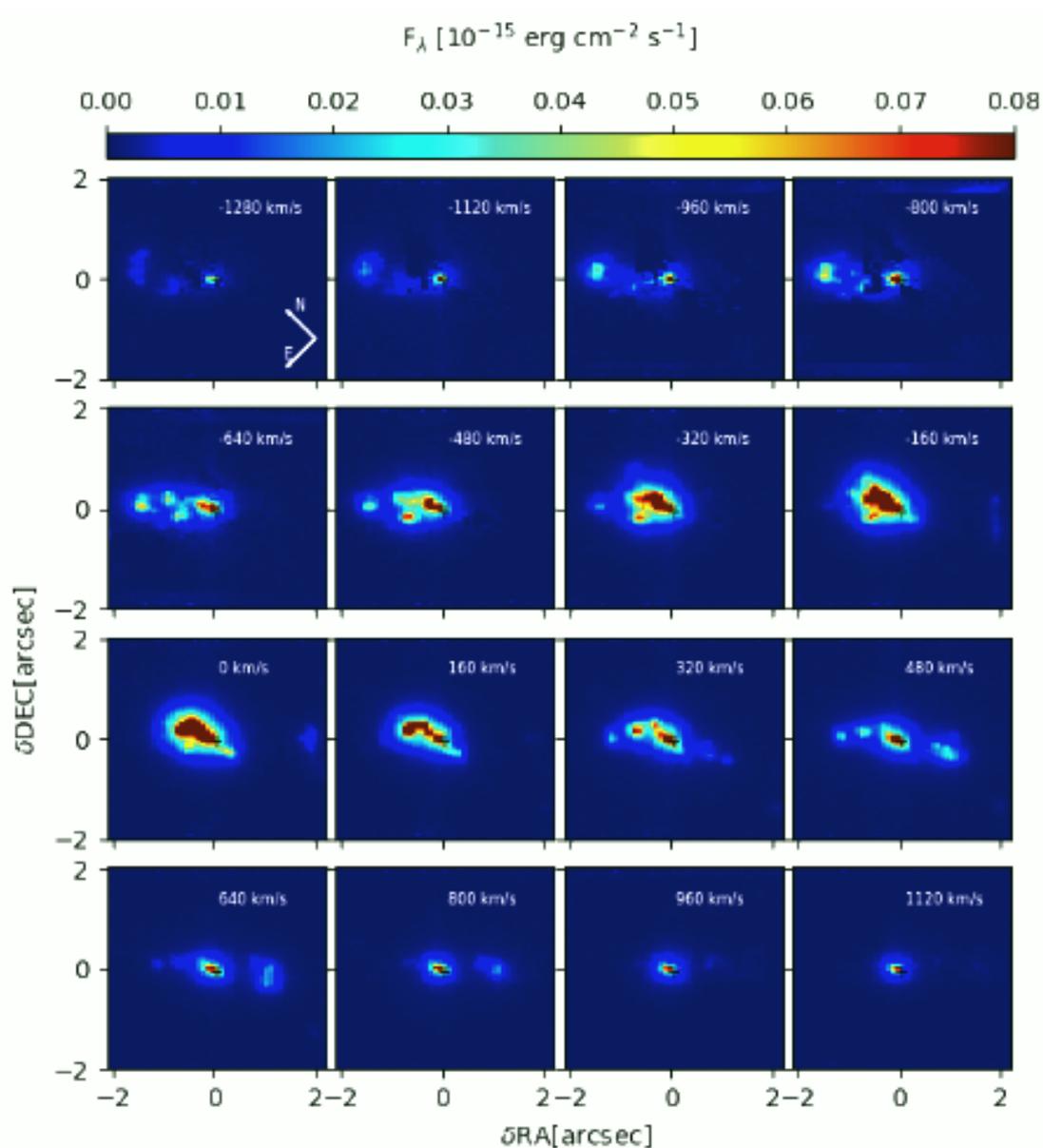
Nas figuras 4.5 e 4.6 apresentamos as tomografias do gás emissor das linhas $[\text{Si VI}]$ e $\text{Br}\gamma$, respectivamente. Integramos os fluxos das linhas em fatias ao longo de seu perfil de emissão, sendo que cada fatia corresponde a dois pixels espectrais adjacentes, tal como foi explicado na seção 3.1. O valor da velocidade central de cada canal (δv) está indicado na parte superior direita. Valores positivos indicam que o gás encontra-se movimentando-se a velocidades maiores que a velocidade sistêmica da galáxia enquanto que para valores negativos, o gás está movendo-se a velocidades menores. Isto se aplica para todos os mapas de canais estudados neste trabalho.

Para a linha de $[\text{Si VI}]$ usamos *bins* de velocidade de $\sim 160 \text{ km s}^{-1}$. A linha associada à região mais interna da NLR é observada em todas as velocidades, o que significa que seu perfil é bastante largo. Ainda, observa-se claramente um fluxo radial de gás, com a componente em *inflow* dominando a região SW e a de *outflow* na região NE. No primeiro caso, a velocidade típica é de $\sim 480 \text{ km s}^{-1}$, enquanto que no segundo a velocidade observada é da ordem de -640 km s^{-1} .

A complexidade da cinemática do gás observada em esta galáxia pode ser vista na figura 4.7, na qual é mostrado o perfil da linha $[\text{Si VI}]$ a diferentes distâncias do núcleo. Os espectros integrados foram extraídos com uma abertura circular de $\sim 0.2 \times 0.2 \text{ arcsec}^2$. Vemos que ao NE o pico da linha encontra-se fortemente deslocado para o azul, poucos parsecs depois o perfil mostra múltiplas componentes. Para as regiões próximas ao núcleo, observamos que o espectro apresenta componentes com larguras de até 1000 km s^{-1} .

Os mecanismos físicos envolvendo *outflows* bi-cônicos geram um aumento da velocidade do gás em regiões afastadas do AGN, nesse caso, a separação entre os picos é maior nos extremos do outflow. Isto foi verificado por [Das et al. \(2006\)](#) com base no fato em que a fotoionização é o mecanismo físico responsável pela emissão observada

Figura 4.5 - Tomografia da linha coronal [Si VI] na galáxia NGC 1068

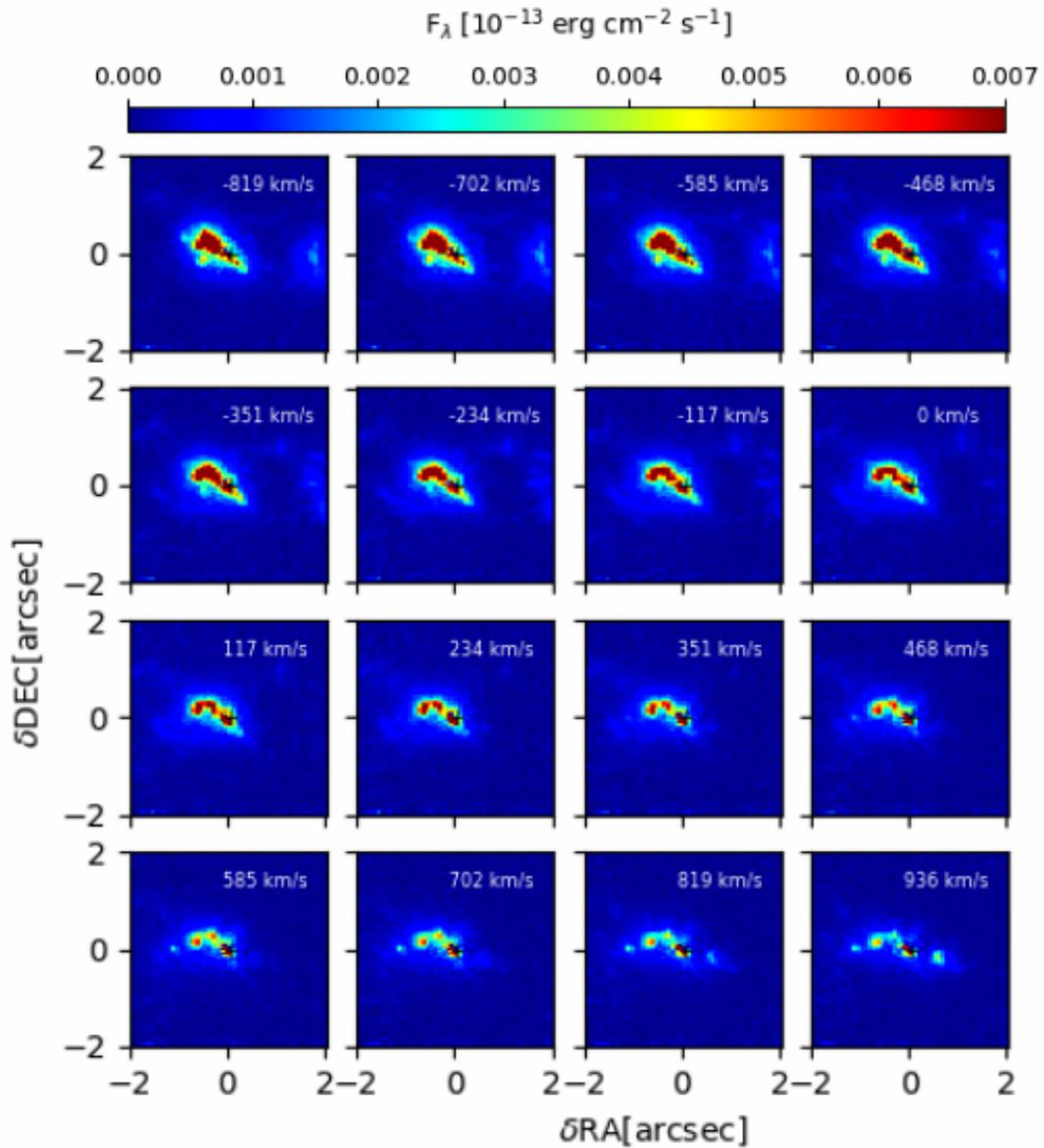


Fonte: Produção do autor.

e usando modelos de *outflows* bi-cônicos.

Na figura 4.6 vemos a tomografia do gás emissor de Br γ . Usamos *bins* de velocidades de 117 km s⁻¹. Observamos um fluxo de gás com uma componente de *outflow* dominando a região SW com uma velocidade típica de ~ -760 km s⁻¹. Esta região emissora é vista nos mapas de canais da linha de alta ionização com velocidade igual a velocidade sistêmica da galáxia. A região do núcleo mostra um perfil largo,

Figura 4.6 - Tomografia do gás emissor de Br γ na galáxia NGC 1068

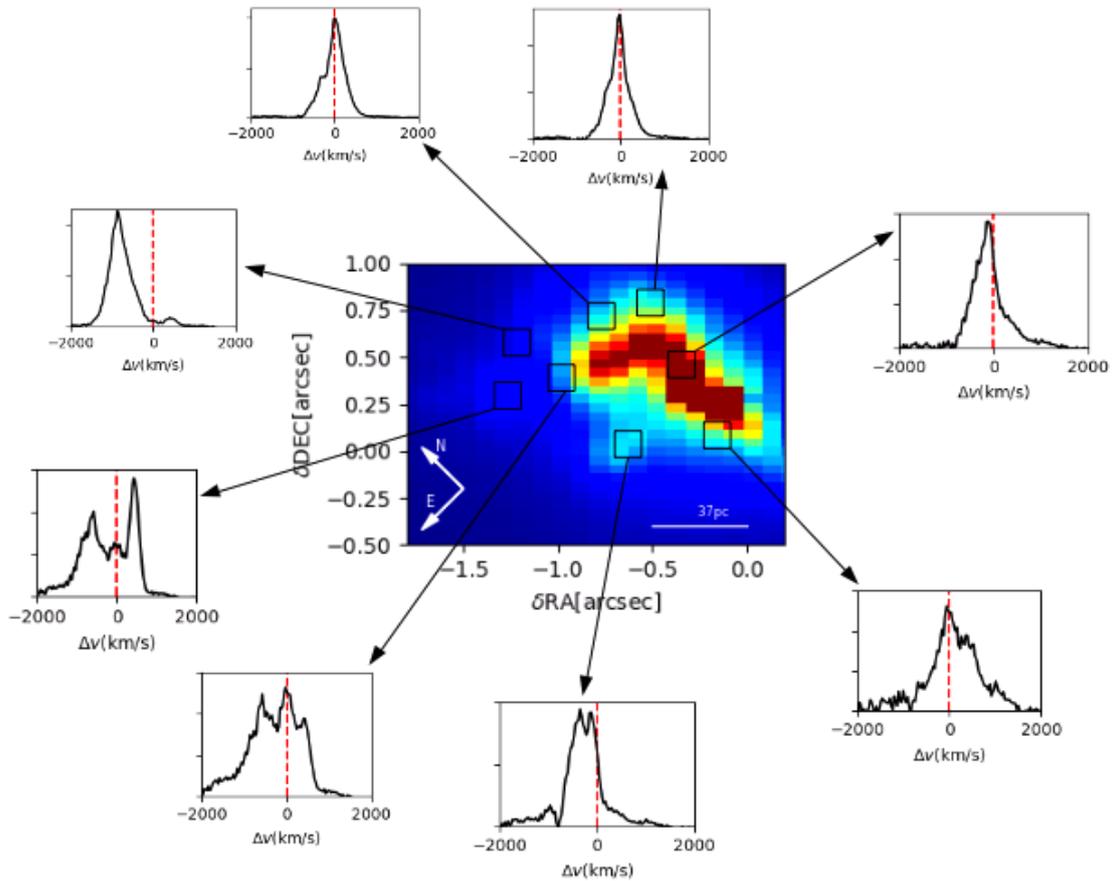


Fonte: Produção do autor.

o que indica que o gás alta e baixa ionização estão acoplados cinematicamente. As tomografias das linhas de emissão estudadas em este trabalho são consistentes com as reportadas por *Mazzalay et al. (2013)*.

Para cada linha de emissão medimos o centroide da componente mais intensa usando o LINER (Ver capítulo 3) e calculamos as velocidades ao longo da direção NE-SW (PA \sim 331 $^\circ$). Na figura 4.8 vemos o gráfico posição-velocidade do gás emissor de [Si VI]

Figura 4.7 - Perfil da linha [Si VI] na galáxia NGC 1068 em diferentes posições ao longo do campo de visada do IFU. A linha vermelha pontilhada representa a velocidade sistêmica da galáxia.



Fonte: Produção do autor.

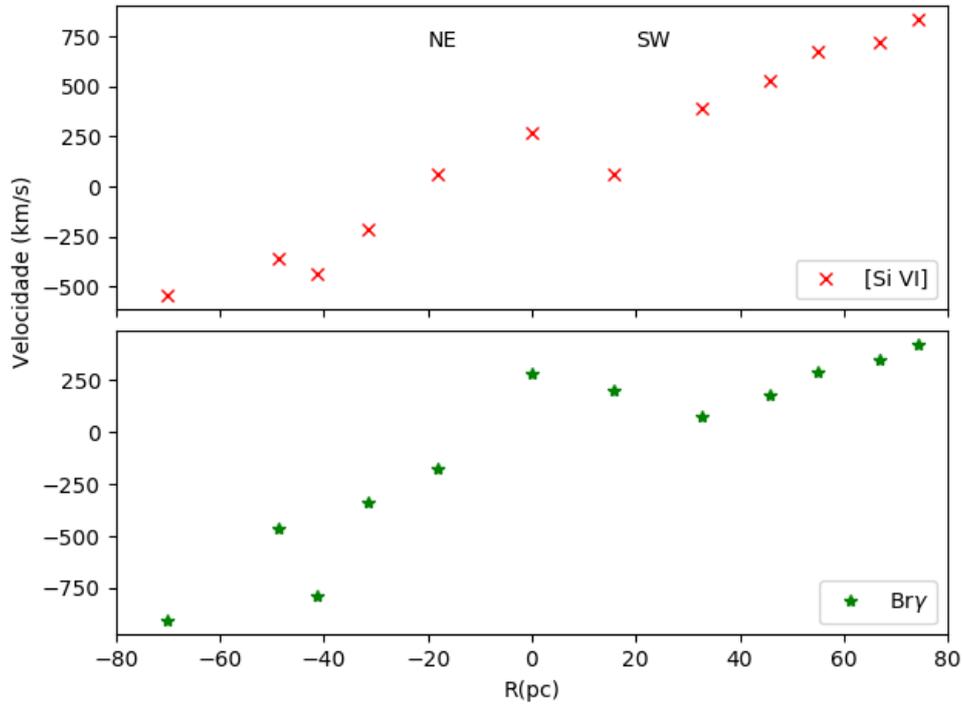
e Br γ . A distribuição observada não é compatível com a esperada para um gás que se encontra movimentando-se em um disco em rotação. De fato, o padrão detectado é bastante assimétrico, refletindo a forte turbulência do gás. Concluímos que a maior parte do gás ionizado encontra-se fora do plano do disco de gás molecular e estelar.

4.2 NGC 4151

4.2.1 Morfologia do gás

São mostrados nas figuras 4.9 e 4.10 os mapas bidimensionais da emissão de CLs e linhas de baixo potencial de ionização observadas nos $\sim 4'' \times 3''$ centrais da galáxia NGC 4151. As barras de cor indicam o fluxo integrado em unidades 10^{-15} erg cm $^{-2}$

Figura 4.8 - Velocidade do gás de [Si VI] e Br γ em função da posição na galáxia NGC 1068



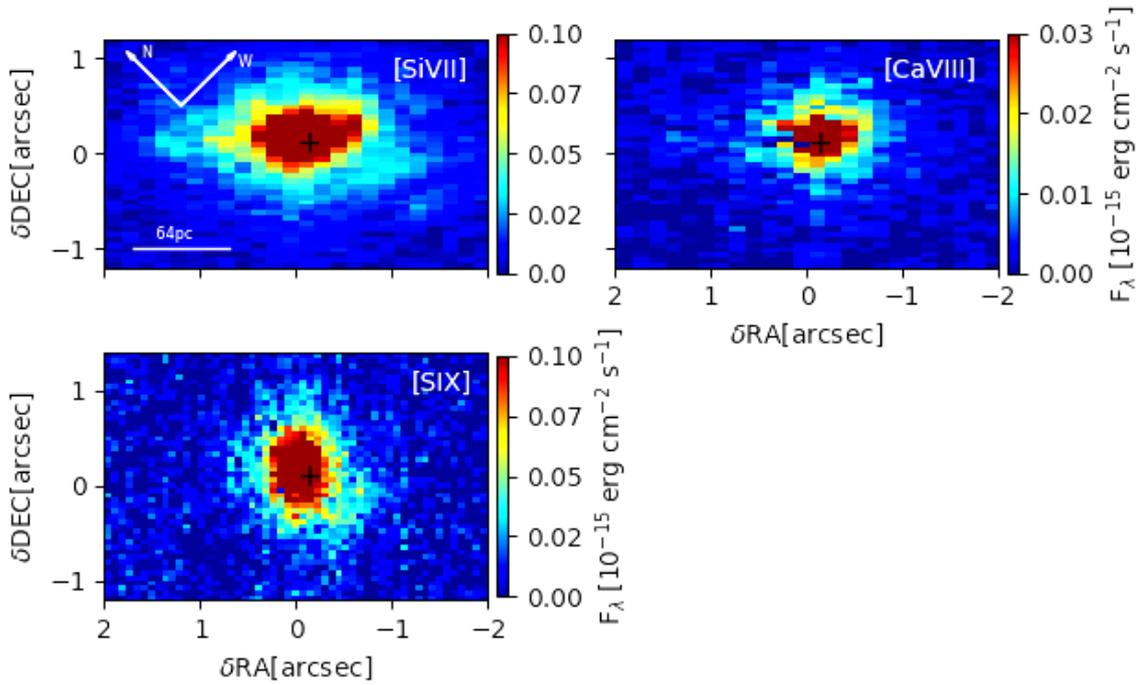
Fonte: Produção do autor.

s^{-1} . A posição do AGN em cada imagem é identificada pelo máximo do contínuo na banda K e é indicado com uma cruz preta em cada imagem.

Na figura 4.9 observamos as CLs detectadas ([Si VII], [Ca VIII] e [S IX]). Todas as linhas de alta ionização apresentam uma distribuição compacta porém resolvida. A emissão vista para [Si VII] é mais estendida que a das outras linhas. Estende-se até $\sim 1.5''$ (96 pc) ao NE-SW e $1''$ (64 pc) ao NW-SE. Para [Ca VIII] vemos uma distribuição homogênea com extensão de até $1''$ na direção NE-SW. A emissão de [S IX] é a mais compacta na direção NE-SW. O gás encontra-se distribuído em até $0.8''$ (51 pc) e $\sim 1''$ ao NW-SE.

Nos mapas de emissão das linhas de baixo potencial de ionização, mostrados na figura 4.10, observamos que o gás emissor de [Fe II] apresenta máximos em emissão em duas regiões opostas localizadas a $1''$ (64 pc) do núcleo na direção N-S. O gás emissor de Br γ apresenta uma distribuição homogênea, com uma extensão de $\sim 1.8''$ (115 pc) na direção NE-SW e $0.8''$ (52 pc) ao NW-SE. Para o gás molecular, representado pela linha de $H_2\lambda 2.12\mu m$, vemos que o gás encontra-se distribuído na direção E-W

Figura 4.9 - Mapa das linhas de alto potencial de ionização para a galáxia NGC 4151



Fonte: Produção do autor.

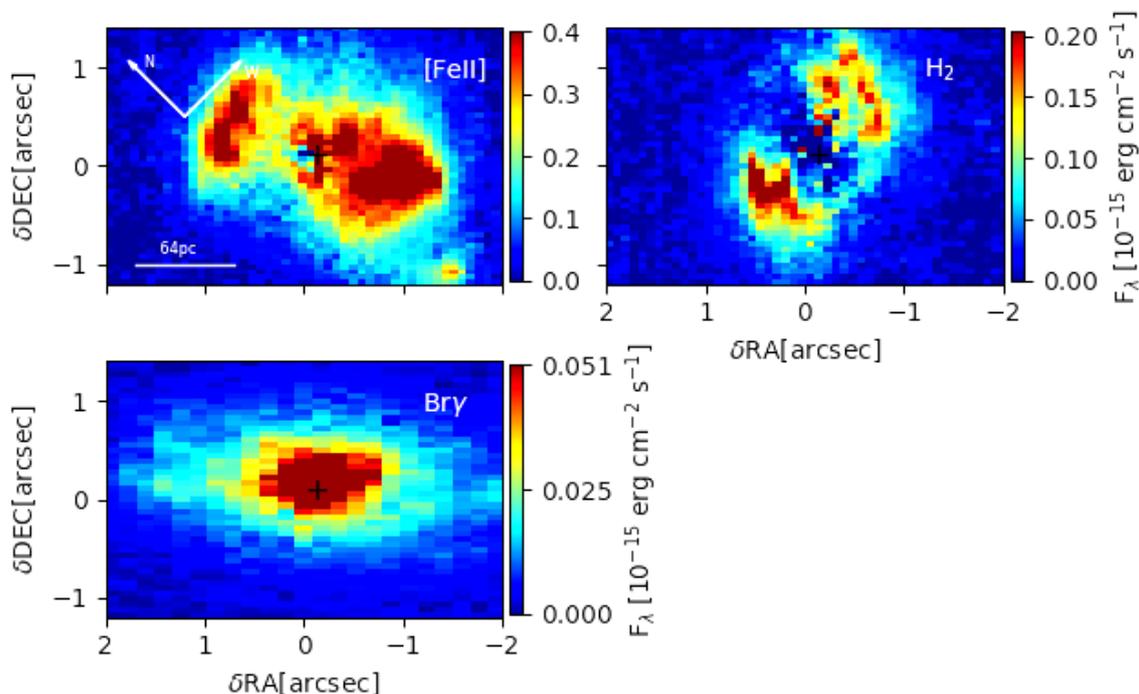
em duas regiões opostas a $\sim 0.8''$ do AGN. No núcleo, não observamos emissão de H_2 . A emissão observada coincide em tamanho, orientação e forma com a reportada por Storchi-Bergmann et al. (2009).

Pelo visto acima, vemos que a distribuição do gás de alta ionização é estendida, apresentado o máximo em emissão no AGN. Isto pode ser constatado observando a distribuição do brilho. Para realizar este gráfico, foi adotado o mesmo procedimento da galáxia NGC 1068. O resultado pode ser observado na figura 4.11.

Observamos que o gás está confinado aos $0.46''$ (30 parsecs) centrais e esta distribuição é independente do estado de ionização do gás. A linha de [Si VII] domina o espectro na banda K, com uma intensidade até 2 vezes maior que as das outras linhas detectadas.

Analisando a emissão de [O III] obtida pelo HST (HUTCHINGS et al., 1997) e a emissão de [Si VII] (Ver figura 4.12), vemos que coincidem espacialmente em uma extensão de até $1''$ (64 pc) na direção N-S. Comparando a figura 4.12 com 4.10, vemos que [O III] é co-espacial com [Fe II], isto também foi observado por Storchi-Bergmann et

Figura 4.10 - Mapa das linhas de baixo potencial de ionização e o gás molecular para a galáxia NG C4151



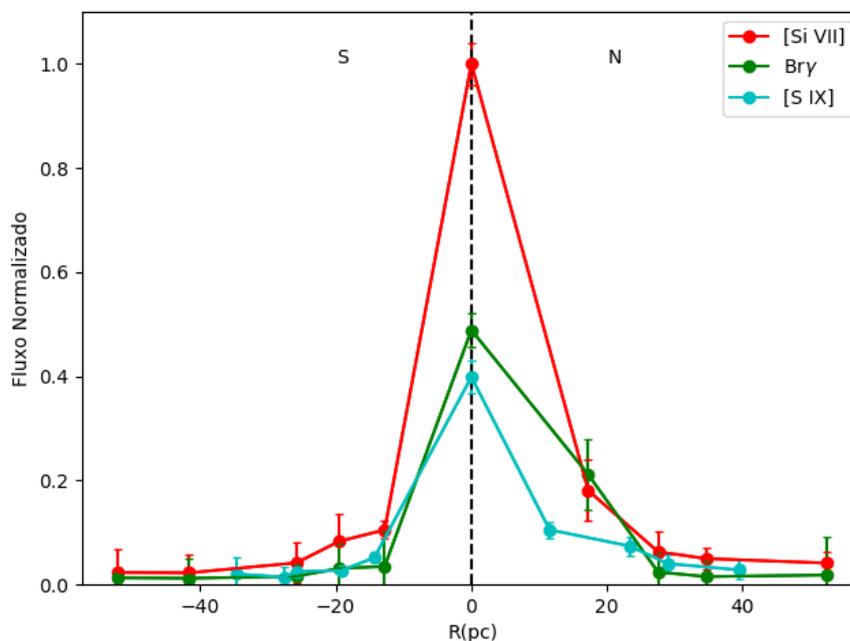
Fonte: Produção do autor.

al. (2009). Entretanto no mapa de [Fe II] é observada uma distribuição do fluxo que diminui saindo do núcleo e aumenta novamente em duas regiões opostas de $\sim 1''$. Esta distribuição do gás não é observada no caso do oxigênio.

Comparando a emissão de H₂ observada na figura 4.12 com as observações no rádio 21 cm de Mundell et al. (1995) e com a emissão de [O III] da figura 4.12, vemos que o gás molecular encontra-se distribuído perpendicularmente. Isso sugere que o hidrogênio encontra-se ionizado em toda a extensão do bi-cone.

Finalmente, comparando a emissão rádio em 21 cm de Mundell et al. (1995) com o gás de [Si VII] vemos que são co-espaciais em até $1''$ do AGN na direção NE-SE. A emissão rádio é mais estendida que a emissão de alta ionização. Isto indica que o jato é emitido na região central e interage com o gás ao seu redor, mas não tem suficiente energia para transportar o gás de alta ionização para regiões mais externas.

Figura 4.11 - Perfil de brilho para as linhas de alto e baixo potencial de ionização na galáxia NGC 4151



Fonte: Produção do autor.

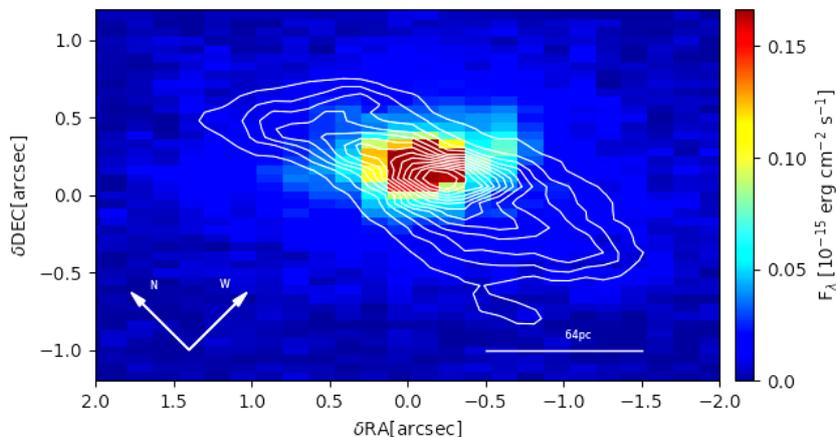
4.2.2 Cinemática do gás

Para obter um maior detalhamento sobre a cinemática do gás de alta e baixa ionização na região central de NGC 4151, construíram-se as tomografias das linhas [Si VII] e Br γ (as mais intensas), as quais podem ser observadas nas figuras 4.13 e 4.14 respectivamente.

Para o mapa da canal de [Si VII] usamos *bins* de velocidade de $\sim 108 \text{ km s}^{-1}$. Vemos que a componente associada à região mais interna da NLR é observada em todas as velocidades, o que indica que é um perfil largo. Além disso, vemos um fluxo de gás com uma componente em *outflow* na região E com velocidades da ordem de -540 km s^{-1} . Outra componente, associada à *inflow* também é observada, mas na direção SW e com velocidade típica de 648 km s^{-1} . Esses resultados são consistentes com os apresentados por Storchi-Bergmann et al. (2009).

Vemos na figura 4.14 os mapas de canais do gás emissor de Br γ . Neste caso, usamos *bins* de velocidade de 82 km s^{-1} . Esta linha exibe uma uma componente de *outflow* ao E do AGN com velocidade média de -328 km s^{-1} . Uma componente em *inflow* ao

Figura 4.12 - Mapa da linha [Si VII] com a os contronos de [O III] do o HST de Hutchings et al. (1997) na galáxia NGC 4151.



Fonte: Produção do autor.

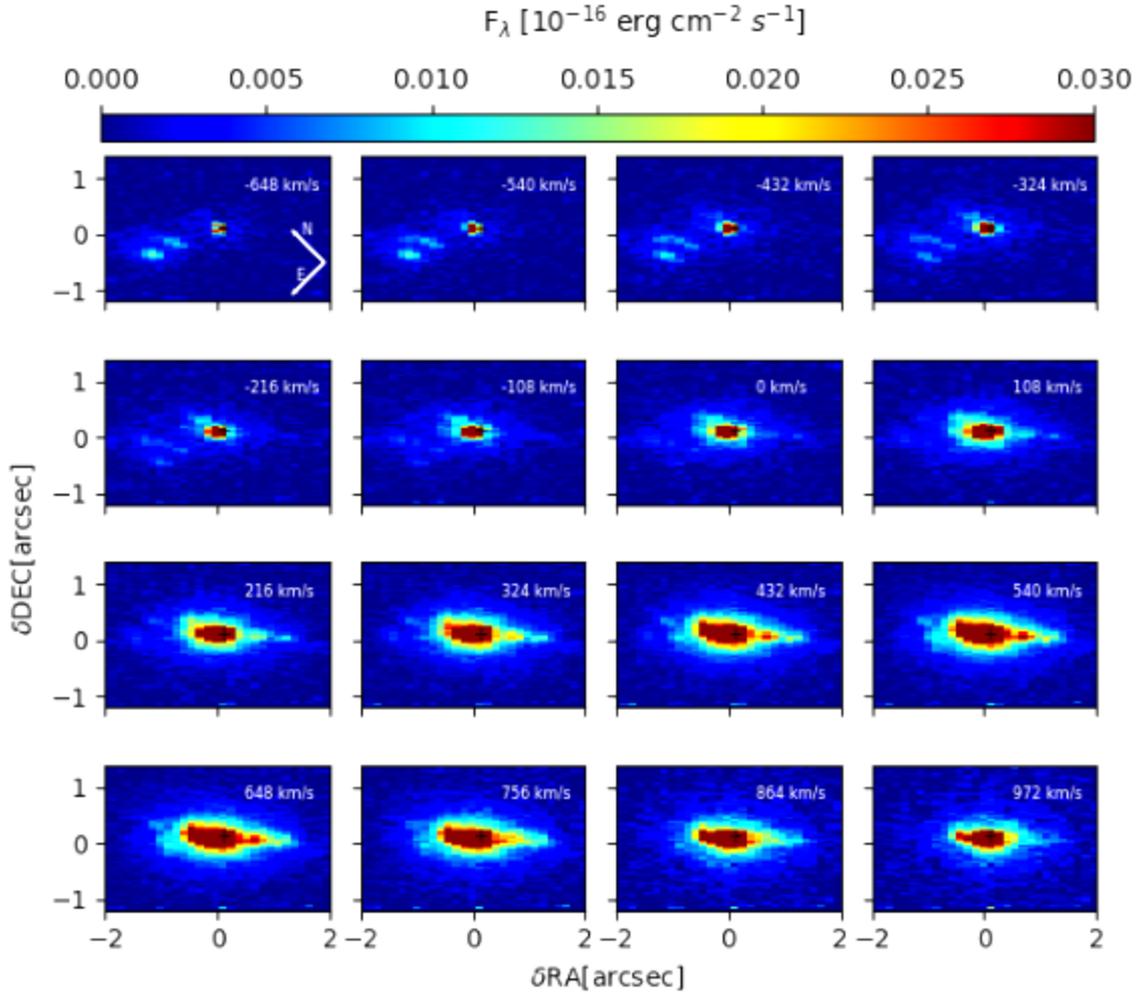
W do núcleo com velocidade de 246 km s^{-1} é também observada. A linha associada à região mais próxima do AGN apresenta um perfil largo, e pode ser observada em todos os canais de velocidade.

Comparando a distribuição do gás emissor de [Si VII] e $\text{Br}\gamma$ vemos que são morfologicamente diferentes. No caso da linha de alta ionização, vemos uma porção do gás em *inflow* que se estende $1.8''$ ao SW com velocidades de até 980 km s^{-1} que não é observada no caso de $\text{Br}\gamma$. As tomografias da linha de baixa ionização mostram uma emissão mais concentrada ao núcleo da galáxia e com uma extensão menor que a observada para o gás de alta ionização.

Foi verificado por Storchi-Bergmann et al. (2009) que o gás ionizado apresenta três componentes. Uma com velocidade igual à velocidade sistêmica e originada no disco galáctico. Uma segunda componente, associada a *outflows* bi-cônicos na linha de visão com velocidades entre $\pm 600 \text{ km s}^{-1}$ e uma componente do jato radio interagindo com o gás. Assim, é provável que a morfologia observada nos mapeamentos de velocidade do gás seja o resultado de uma sobreposição desses fenômenos cinemáticos.

Crenshaw et al. (2000a) estudaram a cinemática da NLR da galáxia NGC 4151 baseados na emissão de [O III] do *Space Telescope Imaging Spectrograph* (STIS) no HST. Eles construíram modelos cinemáticos que fornecem fortes evidências de que a NLR tem um fluxo de saída bi-cônico.

Figura 4.13 - Tomografia da linha coronal [Si VII] na galáxia NGC 4151

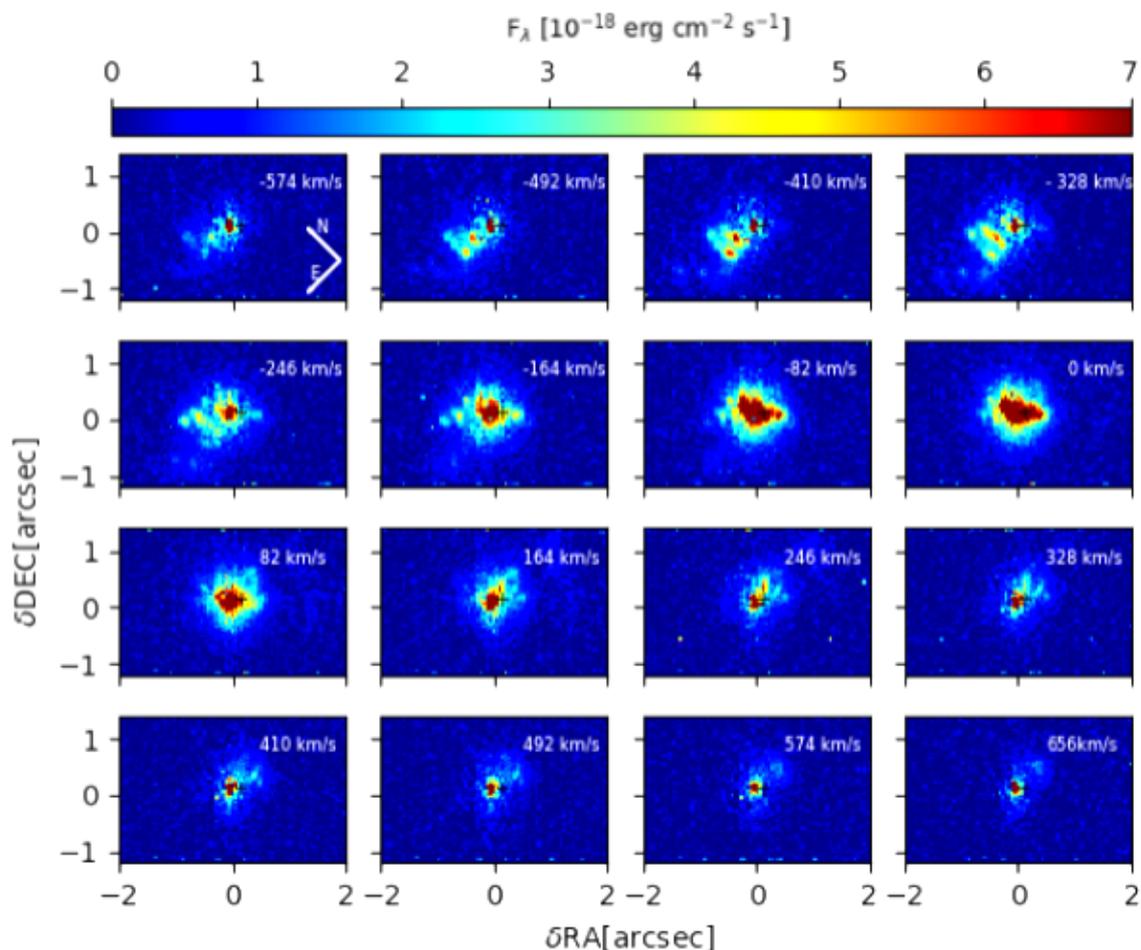


Fonte: Produção do autor.

Alguns estudos da NLR da galáxia NGC 4151 sugeriram que não há relação entre o jato rádio e outflows bi-cônico (HUTCHINGS et al., 1999; CRENSHAW et al., 2000b; DAS et al., 2005). A diferente distribuição do gás no rádio e óptico apoia a ideia de origens distintas para eles: o jato rádio (orientado $PA \sim 75^\circ$) se origina na parte interna do disco de acreção, enquanto a saída bicônica se origina mais longe, provavelmente ainda no disco de acreção. O disco também deve ser entortado para produzir um vento com uma orientação distinta ($PA = 60^\circ$) daquele do jato de rádio.

Os mapas de canais confirmaram que as distribuições de fluxo em altas velocidades não apresentam relação com o jato rádio ao ser comparados com a emissão rádio de Mundell et al. (1995) observada com Merlin. Para velocidades próximas à velo-

Figura 4.14 - Tomografia do gás emissor de $\text{Br}\gamma$ na galáxia NGC 4151.

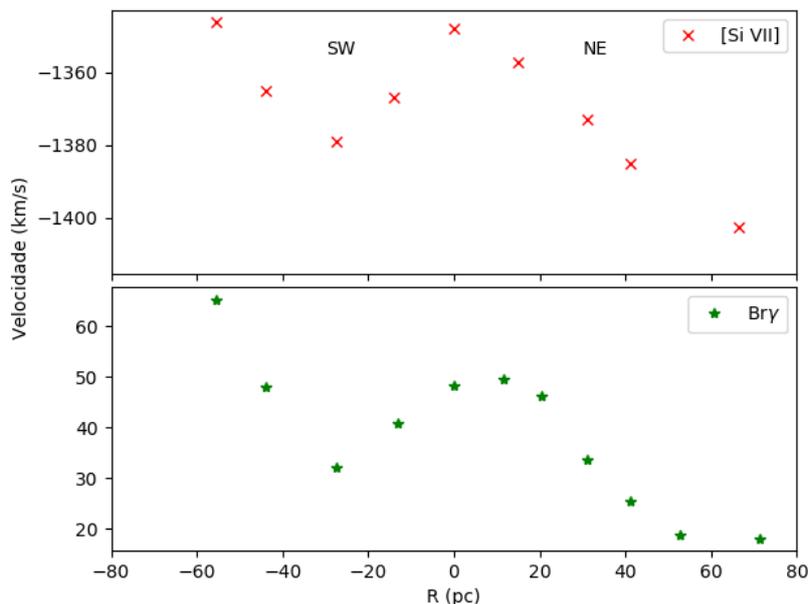


Fonte: Produção do autor.

cidade sistêmica, a distribuições de fluxo tornam-se orientadas ao longo do eixo de rádio ao invés de ao longo do bi-cone. Isto pode ser observado também em Storchi-Bergmann et al. (2010). Uma proposta para explicar a coincidência da emissão rádio para velocidades próximas à velocidade sistêmica é que o jato de rádio foi lançado perto do plano da galáxia e interage com o gás circundante, empurrando-o para fora aproximadamente ao longo do plano.

Na figura 4.15 observamos o gráfico da posição em função da velocidade do gás emissor da linha de alta ionização $[\text{Si VII}]$ e $\text{Br}\gamma$. As velocidades do gás foram medidas usando a posição do centroide da linha de maior intensidade, em este caso, a linha que pertence à componente estreita. Vemos que não existe uma distribuição associada a

Figura 4.15 - Posição em função da velocidade do gás emissor de [Si VII] e Br γ na galáxia NGC 4151



Fonte: Produção do autor.

um gás em rotação em esta galáxia. As observações provavelmente são uma mistura entre a componente em *inflow* e *outflow* observada nos mapas de canais.

4.3 NGC 1386

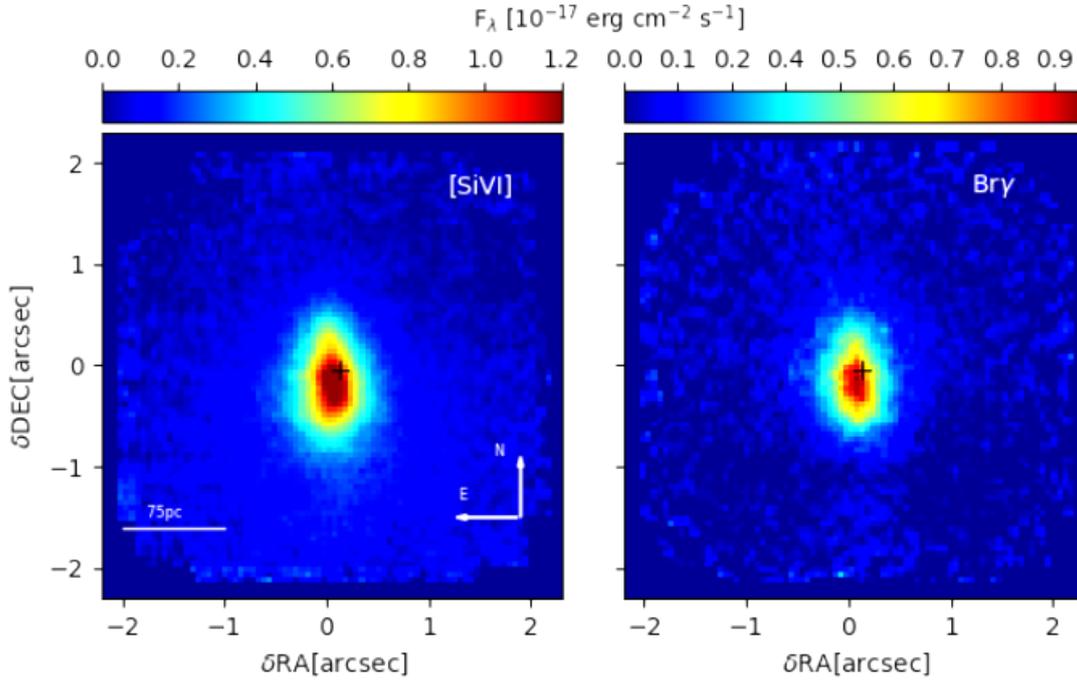
4.3.1 Morfologia do gás

Os dados do VLT/SINFONI possibilitaram mapear a morfologia das CLs detectadas ([Si VI], [Ca VIII]) e Br γ . Na figura 4.16 mostramos os mapas bidimensionais da emissão de [Si VI] e Br γ observados nos $\sim 4'' \times 4''$ centrais da galáxia NGC 1386.

Prieto et al. (2014) mostraram que o núcleo dessa galáxia foi identificado erroneamente como uma região de emissão brilhante do HST-[O III] $\lambda 5007\text{\AA}$ pertencente à NLR. Mas o núcleo verdadeiro encontra-se escondido em uma região de poeira localizado a ~ 17 pc ($0.23''$) ao Norte do máximo óptico detectado. Neste trabalho usamos como referência para a localização do núcleo o pico do contínuo da banda K, já que coincide com o pico verdadeiro. É indicado com uma cruz preta na figura 4.16.

O gás encontra-se distribuído preferencialmente na direção N-S. Para o gás emissor

Figura 4.16 - Mapa das linhas de emissão observadas na galáxia NGC 1386.



Fonte: Produção do autor.

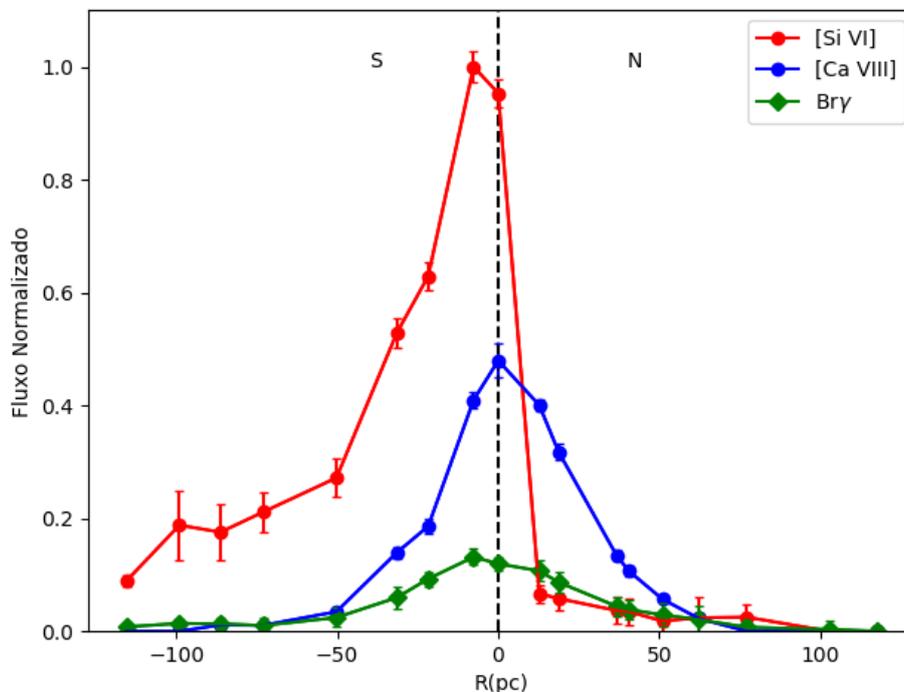
de [Si VI] vemos uma distribuição que se estende $\sim 1''$ (75 pc) na direção N-S e $\sim 0.6''$ (45 pc) no E-W. No caso de [Ca VIII] vemos uma distribuição do fluxo similar morfológicamente à observada para [Si VI], por tanto não é mostrada neste trabalho. No caso de $\text{Br}\gamma$, vemos que o gás mostra uma extensão de até $0.8''$ (60 pc) na direção N-S e com uma distribuição igual à observada para a linha de alto potencial de ionização na direção E-W.

A distribuição do gás observada anteriormente pode ser constatada a partir do perfil de brilho das diferentes linhas detectadas (Ver figura 4.17). O procedimento usado para a construção deste gráfico é o mesmo utilizado no caso da galáxia NGC 1068.

Observamos que o gás tem uma distribuição irregular e é independente do estado de ionização do gás, onde as linhas de [Ca VIII] e $\text{Br}\gamma$ mostram o máximo em emissão no núcleo e a linha de mais alto potencial de ionização apresenta o máximo em emissão a ~ 10 pc do núcleo na direção S. Em intensidade, a linha [Si VI] domina o espectro na banda K.

Comparando a emissão de [Si VI] com a de [O III] observada pelo HST (SCHMITT et

Figura 4.17 - Perfil de brilho para as linhas de alto e baixo potencial ionização para NGC 1386

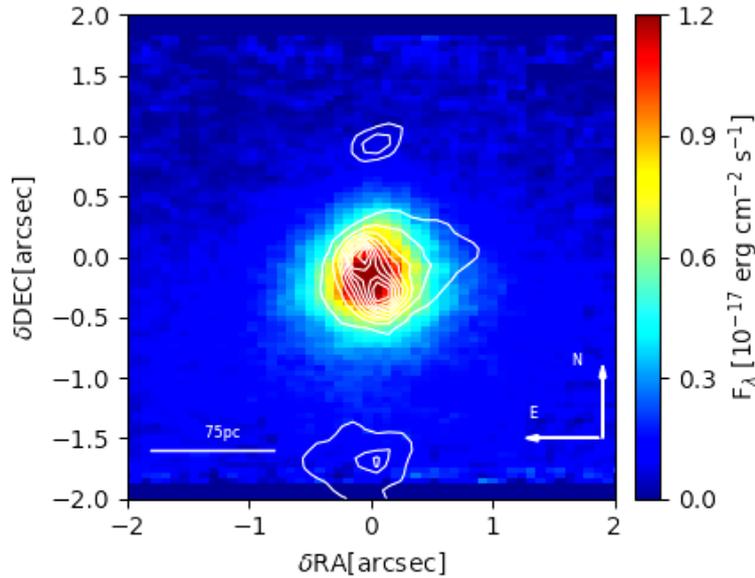


al., 2003) (Ver figura 4.18), vemos uma coincidência espacial no núcleo da galáxia. Porém, em regiões mais afastadas do núcleo, na direção N-S não reportamos emissão de [Si VI] mas sim do [O III]. De fato, essa última linha apresenta uma distribuição que segue o jato rádio, se estendendo até $\sim 2''$ (150 pc) do núcleo. Este cenário concorda com o proposto por Rodríguez-Ardila et al. (2017): um gás em expansão movendo-se em direções opostas em relação ao núcleo e ao longo de nossa linha de visão.

Comparando a emissão rádio em 8.4 GHz obtida por Mundell et al. (2009) com a emissão de alta ionização, vemos que [Si VI] acompanha a emissão rádio, o que sugere que o jato rádio tem influência na formação das linhas de alta ionização.

Foi encontrado por Rodríguez-Ardila et al. (2006) que a emissão de [Fe VII] nesta galáxia se estende até ~ 100 pc do núcleo. O perfil dessa linha mostra duas componentes. Uma azul, e outra vermelha, sendo esta última mais intensa. Esse resultado foi interpretado como um escoamento de gás de alta ionização, no qual cada uma das componentes representam a porção do gás que esta se aproximando e outra se afastando. O cenário anterior foi confirmado por Lena et al. (2015) e aponta para a

Figura 4.18 - Mapa da linha [Si VI] com os contornos de [O III] observada com o HST na galáxia NGC 1386



Fonte: Produção do autor.

existência de um *outflows* nesta galáxia.

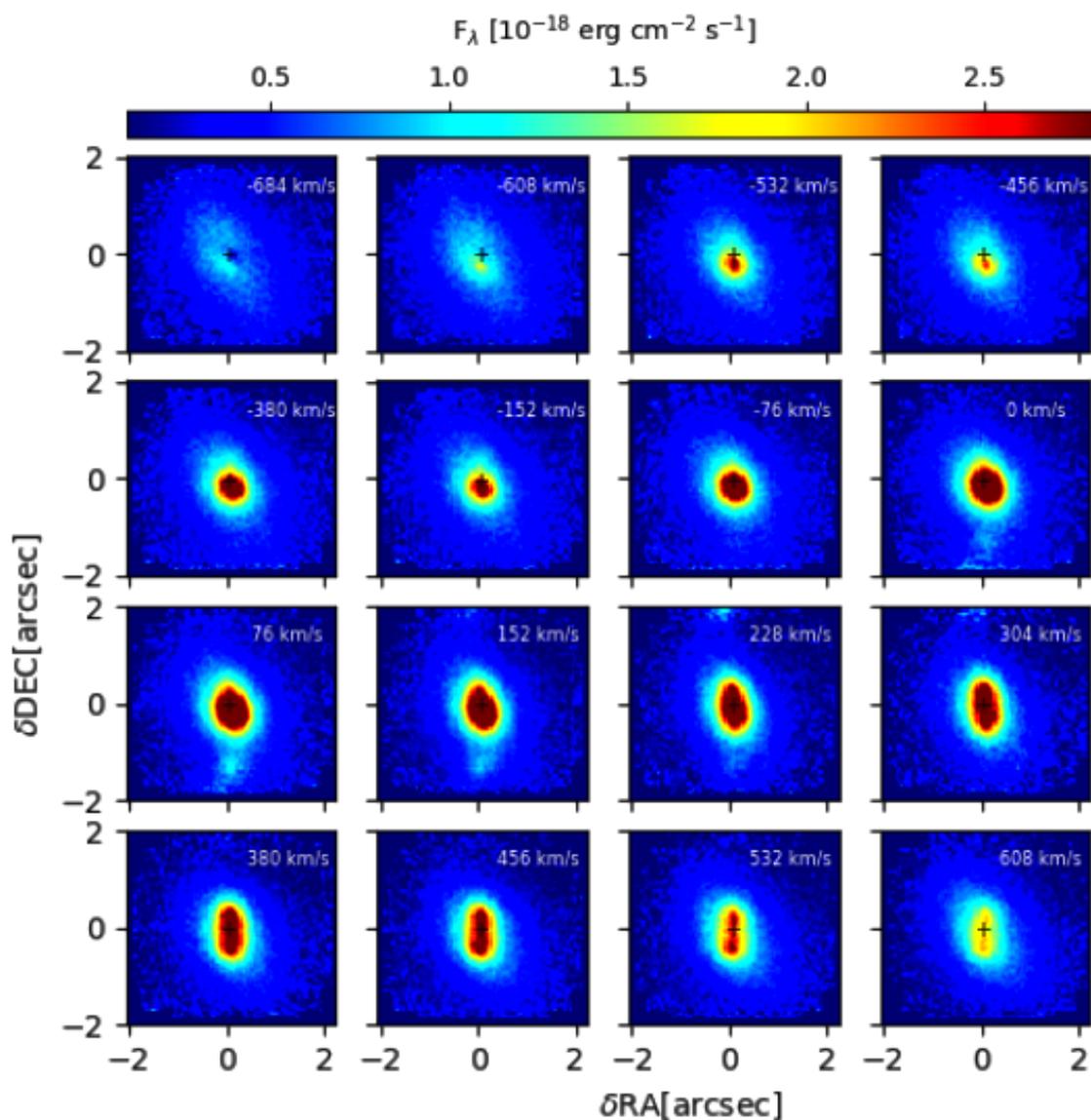
4.3.2 Cinemática do gás

Nas figuras 4.19 e 4.20 apresentamos as tomografias do gás emissor das linhas [Si VI] e Br γ respectivamente. Para a linha de [Si VI] usamos *bins* de velocidade de 76 km s⁻¹. A linha associada à componente mais interna da NLR é observada em todas as velocidades, mostrando uma intensidade maior para valores positivos. É observado um fluxo em *inflow* na região S do AGN, com velocidades típicas de 304 km s⁻¹.

Na figura 4.20 vemos o mapa de canal para o gás emissor de Br γ . A linha associada à região mais próxima do AGN apresenta um perfil largo, com FWHM da ordem de ~ 700 km s⁻¹. Ainda, mostra uma componente fraca associada à *inflows* na região sul, e com velocidades típicas de 116 km s⁻¹. Os mapas de velocidade das linhas de emissão de este trabalho concordam com os mapas reportados por Rodríguez-Ardila et al. (2017).

Estudando as tomografias do gás emissor de [Si VI] e Br γ , vemos que o gás localizado na região sul do AGN é dominado por velocidades positivas tanto ao norte quanto ao sul do AGN. Isso evidencia a presença de um escoamento de gás no qual só vemos

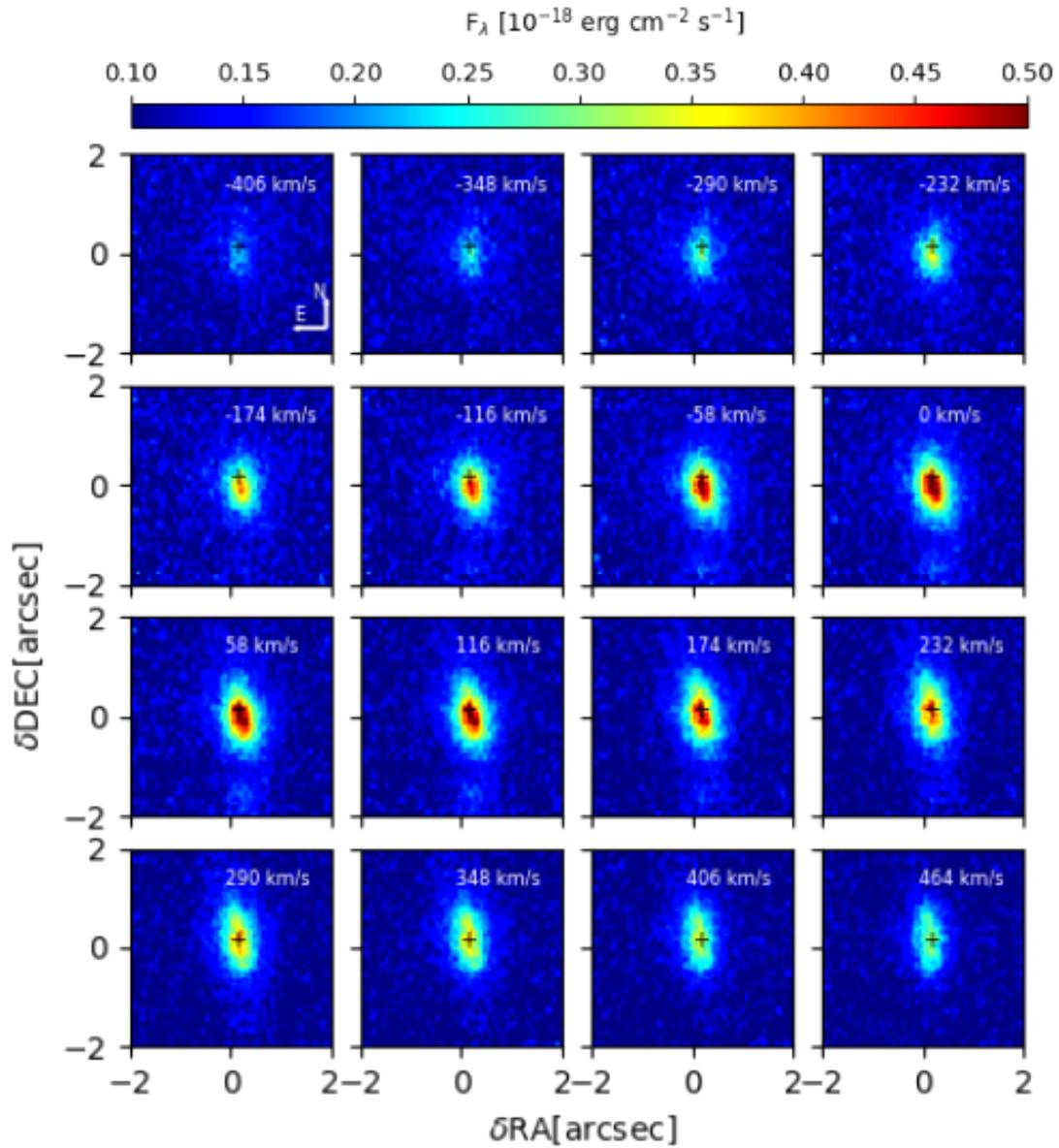
Figura 4.19 - Tomografia da linha coronal [Si VI] para a galáxia NGC 1386



a parte que se afasta do observador. A contrapartida não é observada por causa da presença de poeira nas nuvens da NLR.

Comparando a emissão de [Si VI] com a do rádio em 8.4 GHz (MUNDELL et al., 2009), vemos que a porção do gás em *redshift* segue de perto a distribuição da emissão de rádio, até uma velocidade típica de 450 km s^{-1} . O gás coronal *blueshifted*, por outro lado, é distribuído em uma região quase circular, com o centro deslocado em relação ao centro da emissão rádio. Isto é início de duas componentes opostas

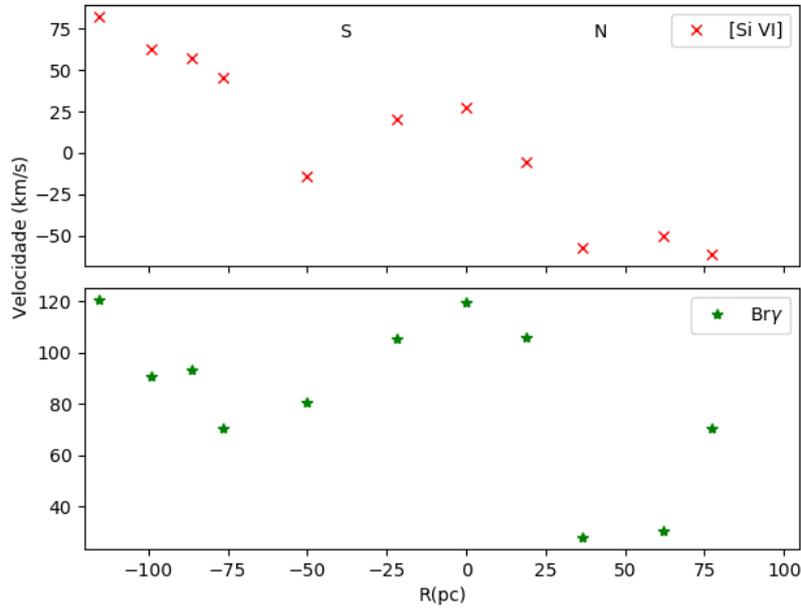
Figura 4.20 - Tomografia do gás emissor de Br γ na galáxia NGC 1386



de gás ao longo da linha de visão, uma aproximando-se e outra se afastando do observador.

Modelos cinemáticos (LENA et al., 2015) sugerem a presença de *outflows* bicônicos e gás em rotação no plano da galáxia. Possivelmente a morfologia observada nos mapeamentos de velocidade do gás é o resultado de uma sobreposição desses fenômenos cinemáticos.

Figura 4.21 - Gráfico posição-velocidade do gás emissor na galáxia NGC 1386



Finalmente, na figura 4.21, vemos o gráfico posição-velocidade do gás emissor para esta galáxia. Vemos que o gás ionizado em NGC 1386 não é dominado pela rotação. De acordo com Mazzalay et al. (2010), Mazzalay et al. (2013), Müller-Sánchez et al. (2011), Rodríguez-Ardila et al. (2017), isto é frequentemente observado na cinemática das linhas coronais (MAZZALAY et al., 2010; MAZZALAY et al., 2013; MÜLLER-SÁNCHEZ et al., 2011; RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2017) e é interpretado em termos do gás fora do plano da galáxia, desacoplado cinematicamente desta. A maior parte do gás é dominado por escoamentos de gás.

4.4 ESO 428-G14

4.4.1 Morfologia do gás

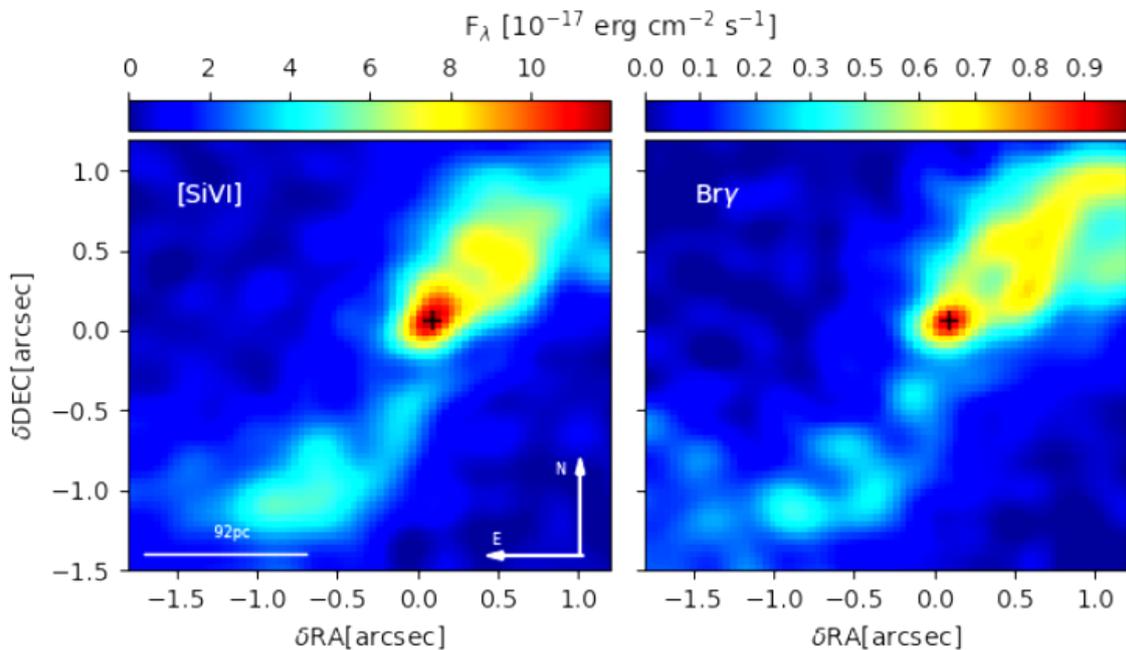
Na figura 4.22 apresentamos os mapas bidimensionais dos fluxos do gás emissor das linhas de [Si VI] e Br γ nos $\sim 2.5'' \times 2.5''$ centrais da galáxia ESO 428-G14. O núcleo é definido pelo máximo da emissão do contínuo na banda K e é identificado com uma cruz preta nos mapas. As barras de cor indicam o fluxo integrado em unidades $10^{-17} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Vemos que os mapas de fluxo apresentam estruturas bipolares estendidas em direções opostas ao núcleo. No caso da linha [Si VI], o gás estende-se até $1''$ (92 pc) na direção

NW e $1.5''$ (138pc) ao SE. Para o gás emissor de $\text{Br}\gamma$ observamos que a emissão é similar à observada para a CL. Porém, a extensão na direção NW se prolonga até $1.3''$ (120 pc), enquanto que a emissão na direção SE é mais fraca, se estendendo até $\sim 1''$.

A característica mais importante neste objeto é que o gás se estende linearmente na direção NW-SE com $\text{PA}\sim 135^\circ$, mostrando múltiplos filamentos. Além do pico associado ao núcleo da galáxia, são observados picos secundários de emissão, sendo os mais proeminentes aqueles localizados a ~ 140 pc SE e a ~ 95 pc ao NW do centro. O primeiro consiste em um *hot spot* brilhante, de forma quase elíptica, de $\sim 80 \times 40$ pc. Uma pequena emissão na direção norte quebra a simetria dessa estrutura. Para o NW do núcleo, observamos uma estrutura bastante peculiar, constituída por filamentos de gás ionizado que forma uma figura de oito, visível mais claramente na imagem de $\text{Br}\gamma$ (ver figura 4.22).

Figura 4.22 - Mapa das linhas de emissão observadas na galáxia ESO 428-G14

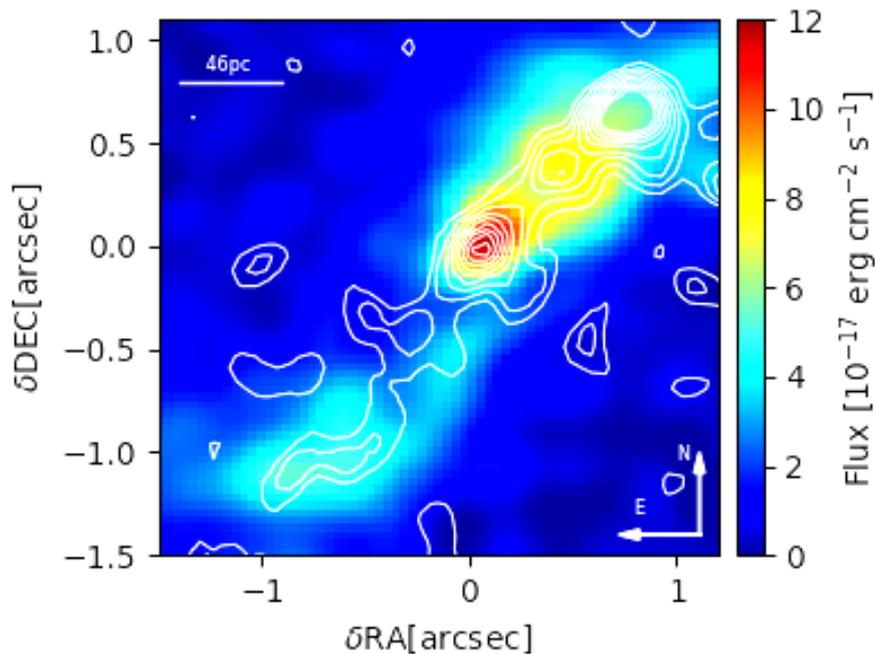


Fonte: Produção do autor.

Comparando a emissão rádio em 2 cm do VLA de Falcke et al. (1998) com a distri-

buição do fluxo de [Si VI] (Ver figura figura 4.23), vemos que o máximo da intensidade da linha coronal coincide com o pico da emissão rádio. A distribuição de gás apresenta uma curvatura na direção NE, o que também é visto na emissão rádio. Este comportamento foi observado previamente por Riffel et al. (2006) para a linha de Br γ . A correspondência observada aponta a que o jato rádio tem influência no comportamento e formação do gás de alta ionização.

Figura 4.23 - Mapa da linha [Si VI] com os contornos 2cm com o VLA para a galáxia ESO 428-G14.

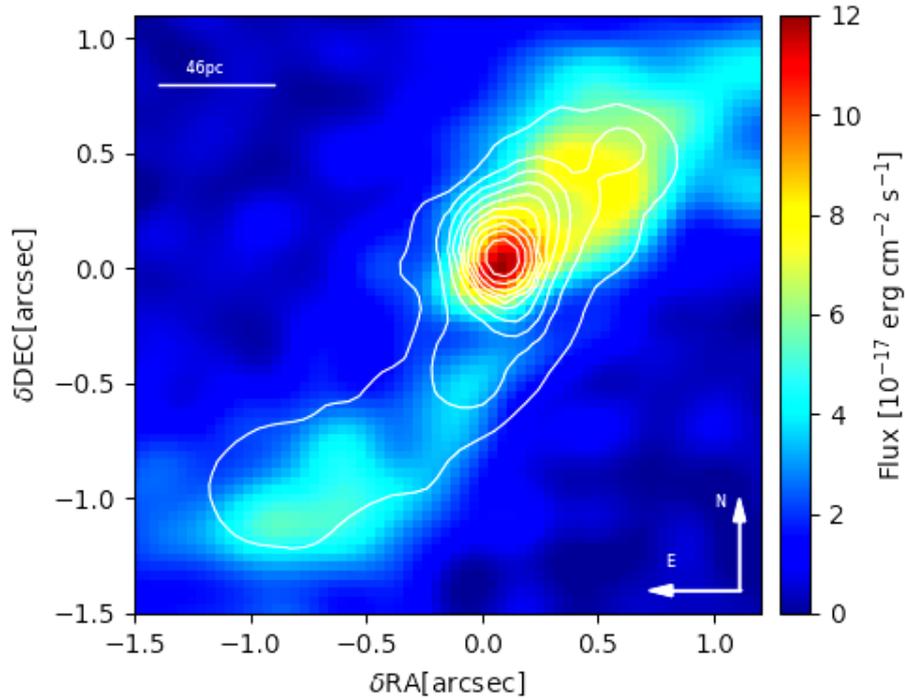


Fonte: Produção do autor.

As características morfológicas mais intrigantes encontradas para esta galáxia são as seguintes: um jato rádio espacialmente correlacionado com a distribuição no gás no óptico (ULVESTAD; WILSON, 1989; FALCKE et al., 1996), e no NIR (este trabalho) na direção NW e que apresenta uma morfologia semelhante a uma figura de "oito", seguindo também a orientação do jato; e a emissão de raios-X duros (??), estendida e co-espacial com a emissão coronal (Ver figura 4.24). Portanto, existe uma correlação entre emissões com diferentes energias que pode ser explicada por uma saída bipolar do gás através da NLR.

Os resultados descritos acima podem ser constatados a partir da distribuição do

Figura 4.24 - Mapa da linha [Si VI] com os contornos de Chandra ACIS-S 3-6 keV de ??) para a galáxia ESO 428-G14.



Fonte: Produção do autor.

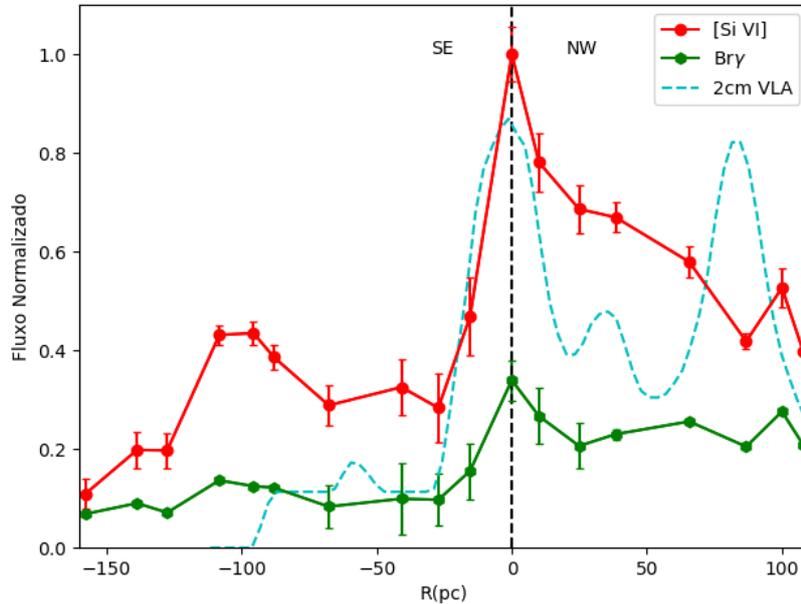
brilho das linhas detectadas. O procedimento para realizar este análise é o mesmo das galáxias anteriores. O resultado para as diferentes linhas se encontra na figura 4.25.

Observamos que o gás tem uma distribuição estendida, irregular, independente do estado de ionização do gás e com o máximo de emissão no núcleo. Na banda K, o espectro encontra-se dominado pela linha [Si VI], que é até 2 vezes mais intensa que a linha de baixa ionização. Este gráfico confirma as observações anteriores, mostrando que o jato rádio tem uma emissão estendida e acompanha a emissão em alta ionização.

4.4.2 Cinemática do gás

Nas figuras 4.26 e 4.27 apresentamos os mapas de canais do gás emissor das linhas [Si VI] e $\text{Br}\gamma$, respectivamente. Na figura 4.28 podemos observar a complexidade cinemática do gás de alta ionização para esta galáxia através do perfil da linha de [Si VI] e diferentes posições no campo de visão do IFU. Podemos ver que o perfil

Figura 4.25 - Perfil de Brilho para as linhas de alta e baixo potencial de ionização na galáxia ESO 428-G14



Fonte: Produção do autor.

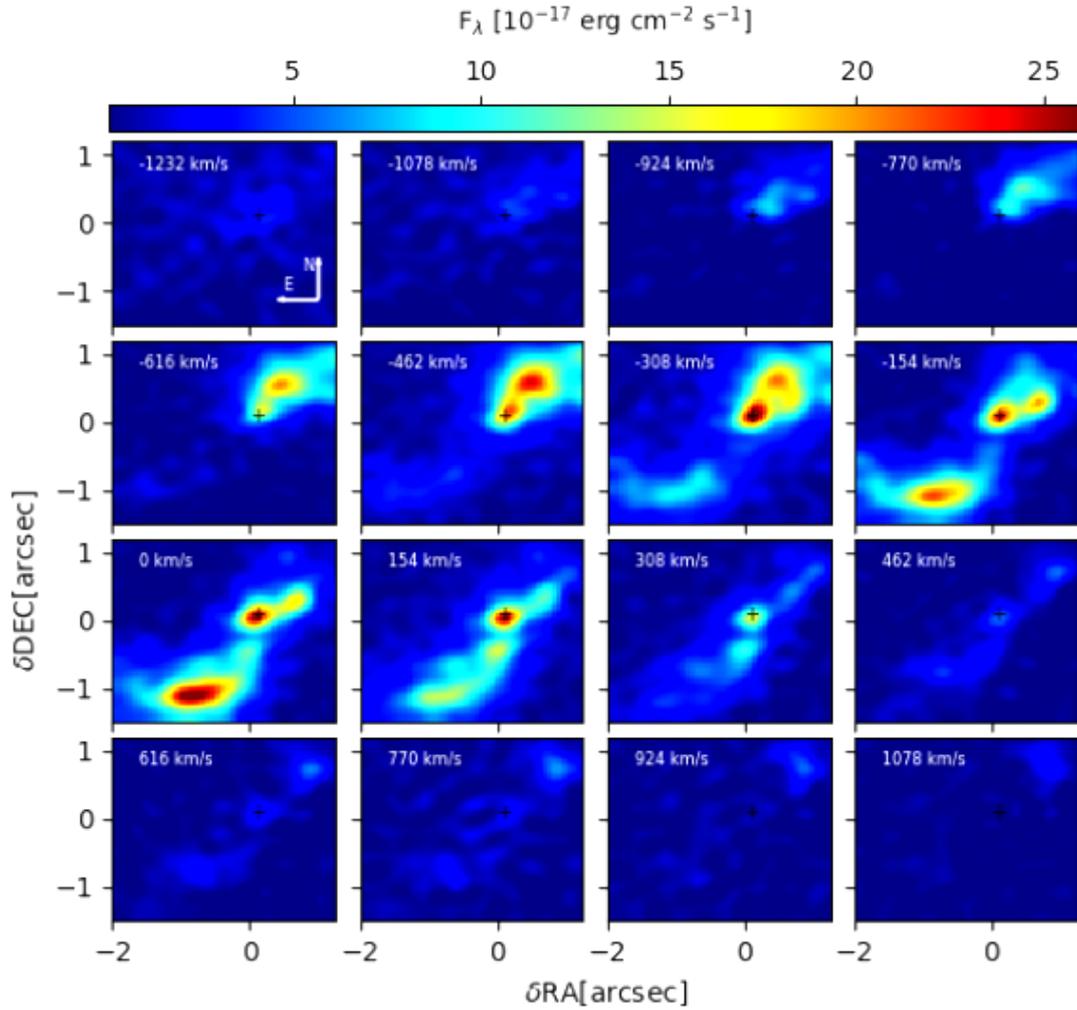
é fortemente assimétrico, apresentado múltiplas componentes nas regiões emissoras mais relevantes.

Para o gás emissor de [Si VI] usamos *bins* de velocidade de 154 km s^{-1} . Vemos um fluxo de gás, com uma componente em *inflow* dominando a região SE e com velocidade média de 154 km s^{-1} . Além disso, apresenta uma componente em *outflow* na região NW com velocidade -462 km s^{-1} . A componente associada à região mais interna da NLR mostra velocidades desde -924 km s^{-1} até 616 km s^{-1} , o que indica que o perfil da linha é largo e assimétrico.

O mapa de canal do gás emissor da linha de $\text{Br}\gamma$ é mostrado na figura ???. Usamos *bins* de velocidade de 50 km s^{-1} . Observamos uma componente do gás em *outflow* na região NW com velocidades de -350 km s^{-1} e na região SE com velocidade -50 km s^{-1} . Conjuntamente, vemos uma componente em *inflow* dominando a região SE com velocidades de 50 km s^{-1} . A região mais interna da NLR mostra um perfil largo, portanto, pode ser observada em todas as velocidades.

Em resumo, as características cinemáticas mais relevantes encontradas nesta galáxia

Figura 4.26 - Tomografia da linha coronal [Si VI] na galáxia ESO 428-G14.

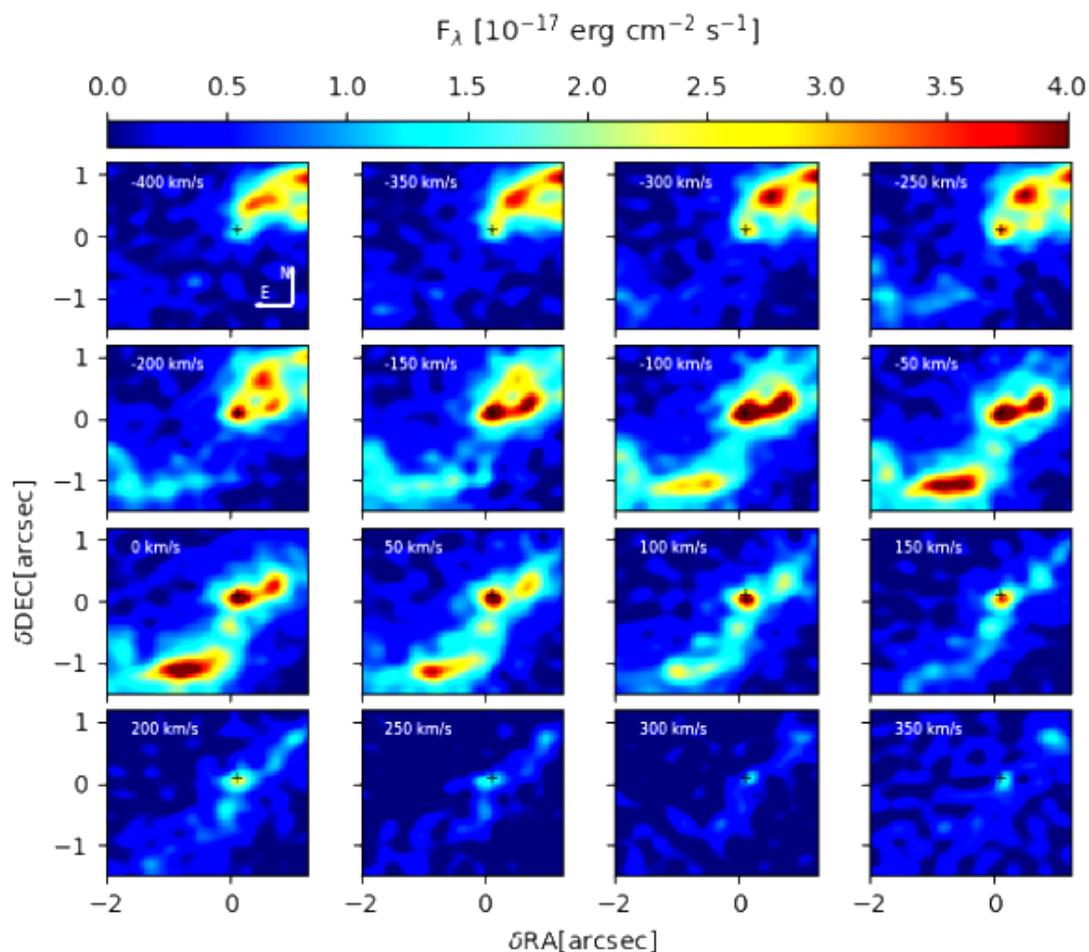


Fonte: Produção do autor.

são::

- O gás [Si VI] no núcleo abarca um grande intervalo de velocidades, cobrindo quase todos os valores (*blueshifted* e *redshifted*) mapeados neste objeto.
- A região mais intensa localizada ao SE do núcleo é dominada por gás de baixa velocidade, com $v < 150 \text{ km s}^{-1}$.
- A detecção de dois "*knots*" em direções opostas do AGN e alinhadas com o eixo do jato de rádio. Ambas podem ser vistas com velocidades positivas (*redshift*), a partir de 460 km s^{-1} . A região ao SE está localizada a 0.6

Figura 4.27 - Tomografia do gás emissor de Br γ na galáxia ESO 428-G14.

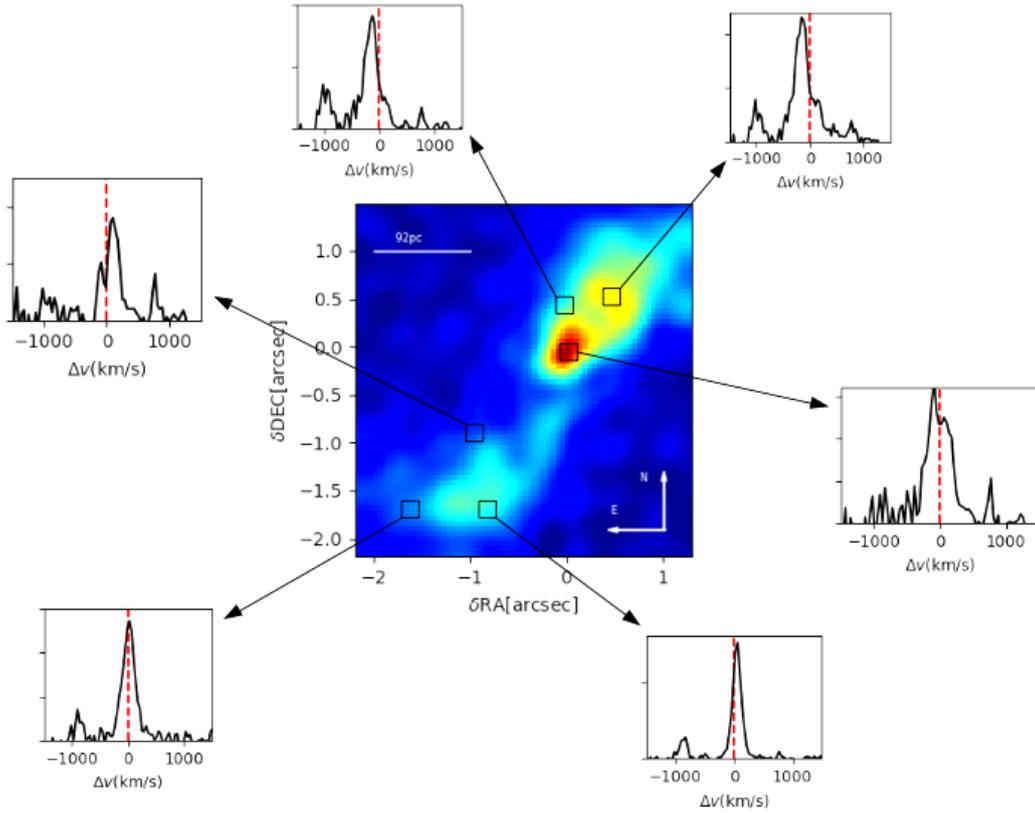


Fonte: Produção do autor.

arcsec (~ 50 pc) do AGN, enquanto a contraparte do NW a 0.7 arcsec ou ~ 65 pc.

Os dados IFU da galáxia ESO 428-G14 revelam um campo de velocidade muito complexo, refletido nos perfis de linha. Esta complexidade cinemática observada em esta galáxia pode ser vista na figura 4.28, na qual é mostrada variação do perfil da linha de [Si VI] observada em espectros integrados extraídos com uma abertura circular de $\sim 0.2 \times 0.2 \text{ arcsec}^2$ em diferentes regiões. Na maioria das posições, vemos que os perfis de linha são divididos em múltiplas componentes, principalmente na direção NW. Para as regiões mais afastadas do AGN, o perfil está deslocado para o azul na direção NW.

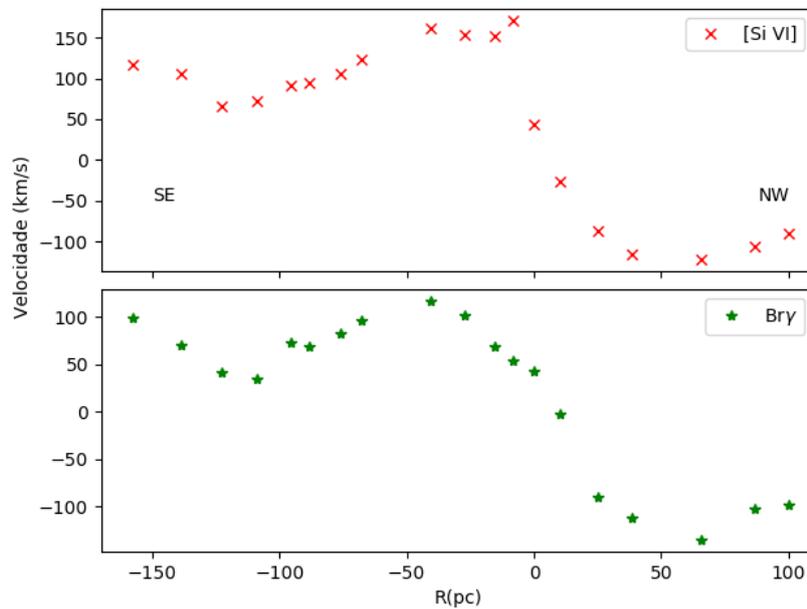
Figura 4.28 - Perfil da linha [Si VI] na galáxia ESO 428-G14 em diferentes posições ao longo do campo de visada do IFU. A linha vermelha pontilhada representa a velocidade sistêmica da galáxia.



Fonte: Produção do autor.

Na figura 4.29 vemos o gráfico posição velocidade do gás emissor de [Si VI] e $\text{Br}\gamma$ na direção SE-NW para esta galáxia. No entanto, devido à complexidade do perfil de linha, não é possível restringir as múltiplas componentes em que às vezes é dividido. Portanto, ajustamos sempre uma única Gaussiana para a componente de linha mais intensa. Vemos que o gás de alta ionização não traça um padrão de rotação. As velocidades do gás muda desde negativas (*blueshifts*) até positivas (*redshifts*), o pico em fluxo move-se de NW para SE, aproximadamente seguindo o caminho traçado pela emissão rádio (RIFFEL et al., 2006).

Figura 4.29 - Gráfico posição-velocidade para a galáxia ESO 428-G14



Fonte: Produção do autor.

4.5 Comparações Gerais

A análise da morfologia e a cinemática do gás realizada ao longo deste capítulo mostra elementos em comum que são apresentados a seguir.

- Observa-se que a emissão do gás de alta ionização é estendida.
- Particularmente, a emissão de [Si VI] e [Si VII] é mais estendida, tipicamente em escalas que superam 100 pc do núcleo. Por outro lado, [Ca VIII], apesar de ser uma linha coronal, apresenta uma emissão mais compacta, restrita a dezenas de parsecs do núcleo. Essa diferença pode ser entendida em termos de abundância química, já que o segundo é 20 vezes menos abundante que o primeiro. Ainda, os grãos de poeira presentes nestes objetos podem ter evaporado a maior parte dos silicatos mas não o cálcio.
- Os espectros apresentam perfis complexos para as linhas de alta ionização. Mostram variações em forma e intensidade para diferentes posições.
- As linhas que possuem maiores IPs estão sistematicamente mais próximas do jato rádio. Correlações entre o gás ionizado e a emissão rádio são vistos

em todas as galáxias da amostra o que sugere que a cinemática das CLs está dominada, em grande parte, pela interação entre o gás e o jato observado em rádio.

- O gás de alta ionização não apresenta o gradiente de velocidade com a posição característico de rotação em um plano. Observa-se que a maior parte deste encontra-se deslocado para o azul, o que sugere que domina uma componente de *outflow*.

5 MODELOS DE FOTOIONIZAÇÃO

Como foi explicado no capítulo 1, as CLs podem ser originadas em um plasma quente ionizado colisionalmente ou em um gás fotoionizado pela fonte central. Os dados IFU estudados neste trabalho permitem obter uma visão mais abrangente das regiões centrais da amostra de galáxias. Os resultados obtidos até agora permitem afirmar que o jato rádio tem um papel importante na emissão de CLs. A boa correspondência entre a emissão das CLs e a emissão rádio observada nas tomografias e nos mapas de emissão sugerem que a morfologia e a cinemática do gás emissor de linhas coronais está determinada em grande parte pela interação entre o gás da NLR e o jato rádio presente nesses AGNs.

Nos AGNs há uma grande quantidade de energia gravitacional liberada em forma de radiação, jatos e ventos. Tais mecanismos são responsáveis por acelerar o gás em forma de *outflows*. Para as galáxias observadas neste trabalho, encontramos que o gás emissor de linhas de alto potencial de ionização apresenta componentes que não seguem um padrão de rotação, indicando que o mesmo se estende a altas latitudes galácticas, reforçando a hipótese dos *outflows*. Estes já foram mapeados em estudos prévios de galáxias ativas em comprimentos de onda ópticos e rádio (DAS et al., 2005; DAS et al., 2006; MORGANTI et al., 2007; BARBOSA et al., 2009) e podem ser devidos à interação de jatos de partículas ou ventos emitidos pelo disco de acreção com o ISM circundante. A interação entre o jato rádio e o ISM foi observada por Winge et al. (1997), Falcke (1998), Winge et al. (1999), Barbosa et al. (2009) e parece ser a origem dos *outflows* observados, uma vez que as distribuições de fluxos e a cinemática do gás têm uma clara associação com a emissão rádio.

Os ventos emanados dos discos de acreção têm sido modelados por processos magneto-hidrodinâmicos e a aceleração do vento pode ser devida a processos térmicos, pressão de radiação e/ou campos magnéticos. Nos processos térmicos o disco de acreção pode perder massa quando sua atmosfera é aquecida. Este aquecimento pode resultar da irradiação das partes mais externas (mais frias) do disco pela emissão das partes mais internas (mais quentes). Estes processos são importantes para temperaturas acima de 10^7 K. Para temperaturas menores que 10^5 K, a pressão de radiação do gás é eficaz na produção dos ventos. Campos magnéticos também estão presentes no disco de acreção e podem acelerar o gás ionizado, produzindo *outflows*.

Proga (2007) apresenta uma revisão bastante detalhada sobre os processos físicos envolvidos na teoria de ventos em AGNs. Enquanto que os *outflows* do núcleo são facilmente observados, observações de *inflows* são escassas na literatura.

Pelo observado no capítulo 4, o jato-rádio interage com o gás de alta ionização. Neste trabalho, vamos estudar a fenomenologia associada na produção das linhas de alta ionização, com este intuito, realizamos modelos de fotoionização e assim, vamos verificar se a fotoionização pela fonte central é o principal mecanismo na produção das linhas coronais.

Para atingir nosso objetivo, seguimos o enfoque multi-nuvem de [Kraemer and Crenshaw \(2000\)](#). Com esse intuito, construímos, pela primeira vez na literatura, grades de modelos de fotoionização para linhas de alta ionização no infravermelho usando CLOUDY (Version C17.00 [Ferland et al. \(2017\)](#)). Detalhes sobre o código de fotoionização são fornecidos na seção 3.3. O intuito é verificar se a fonte central é capaz de gerar a distribuição de gás coronal observado. Caso contrário, outros mecanismos devem ser invocados para explicar a morfologia e estado de ionização medidos nos objetos da amostra.

Modelos de fotoionização por uma fonte central assumem que a energia necessária para gerar o espectro de linhas de emissão observado é originada por fótons ionizantes emitidos pelo AGN. Portanto, temos que assumir algumas propriedades do gás emissor. Entre os parâmetros de entrada para a construção dos modelos usamos: a densidade do gás, a distância da fonte central à nuvem emissora, a luminosidade bolométrica do AGN, a distribuição espectral de energia da fonte ionizante e a metalicidade.

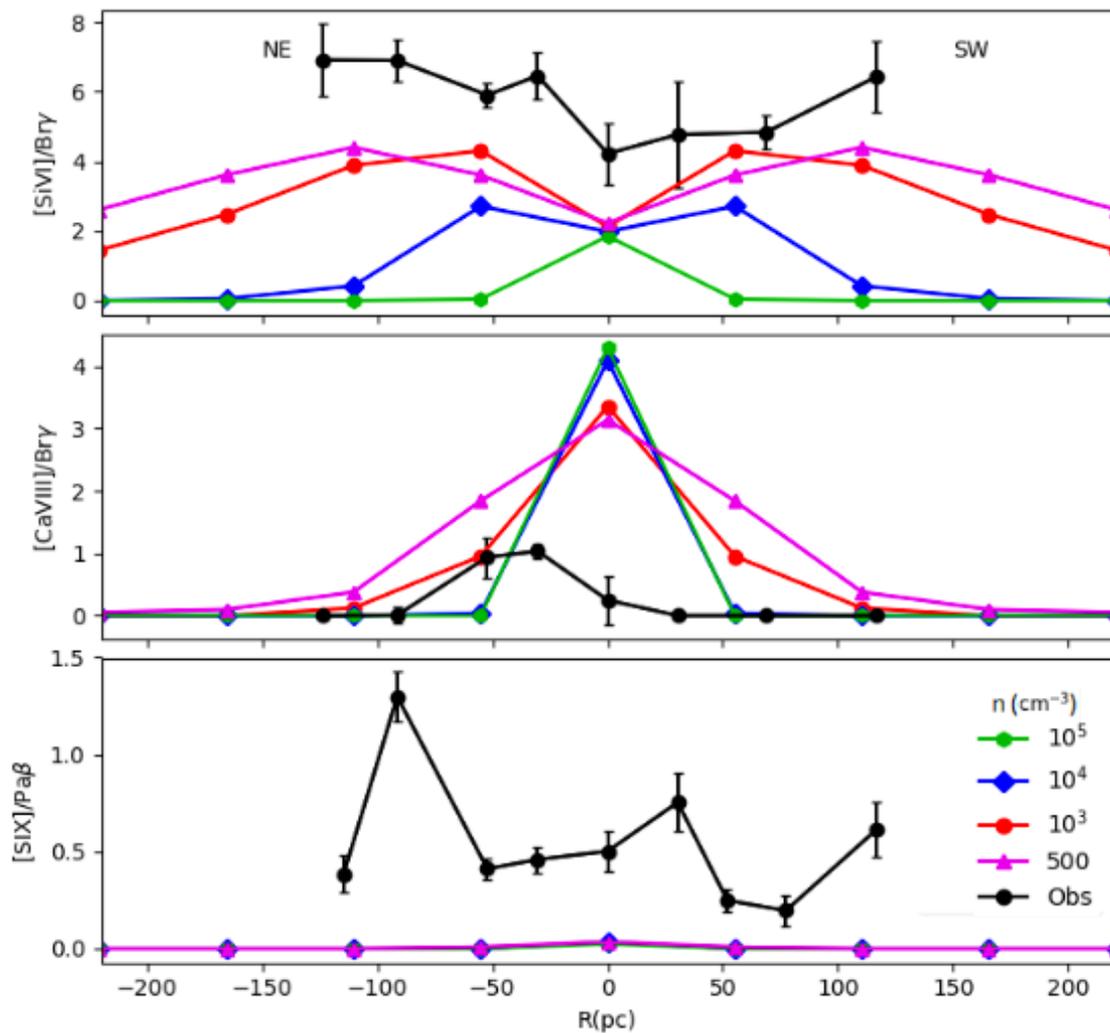
Em [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#) verificou-se que abundâncias químicas derivadas através de modelos de fotoionização aplicados à NLR de AGNs eram consistentes com as abundâncias extrapoladas de regiões H II do disco. Portanto, para os modelos desenvolvidos neste capítulo, usamos a metalicidade solar de [Grevesse et al. \(2011\)](#). Uma geometria plano-paralela foi adotada em todos os modelos. Ainda, foi utilizado o contínuo ionizante de [Mathews and Ferland \(1987\)](#), que representa o contínuo típico de um AGN *radio-quiet* e consiste em uma série de leis de potência da forma $f_\nu \propto \nu^\alpha$, onde α tem valores que dependem do comprimento de onda. Usamos nuvens com densidades $n_{\text{H}} = 500, 10^3, 10^4$ e 10^5 cm^{-3} . Esses valores estão dentro do intervalo esperado para a NLR de AGNs.

Os modelos de fotoionização foram gerados utilizando os parâmetros iniciais acima, produzindo o espectro de linhas de emissão que será comparado com os dados observacionais. Nas próximas seções vamos discutir os modelos obtidos para cada uma das galáxias da amostra.

5.1 NGC1068

Nos modelos de fotoionização realizados com CLOUDY para esta galáxia, utilizamos a luminosidade bolométrica $L_{\text{Bol}}=2.4 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ (DAS et al., 2006). Na figura 5.1 observamos as previsões para $[\text{Si VI}]/\text{Br}\gamma$, $[\text{Ca VIII}]/\text{Br}\gamma$ e $[\text{Si IX}]/\text{Pa}\beta$. Os valores observacionais foram medidos nos espectros dessa galáxia, extraídos com uma abertura circular de $\sim 0.2 \text{ arcsec}^2$ na direção NE-SW do núcleo. Esta mesma abertura foi utilizada nas outras três galáxias da amostra. O erro nas razões observadas corresponde a 2σ em todos os casos.

Figura 5.1 - Previsões dos modelos CLOUDY vs observações para a galáxia NGC1068.



Fonte: Produção do autor.

Os resultados para $[\text{Si VI}]/\text{Br}\gamma$ mostram que não há uma combinação de nuvens adequada para descrever os valores dessa razão de fluxo observado. Modelos de fotoionização com altas densidades ($n_{\text{H}} \geq 10^4$) produzem emissão até algumas dezenas de parsecs, enquanto a emissão observada é mais estendida. Portanto, modelos de baixas densidades (500 e 10^3 cm^{-3}) são melhores candidatos para descrever as observações. Particularmente, existem dois pontos observacionais que, dentro dos erros calculados, exibem uma combinação de nuvens de baixa densidade que reproduz os valores medidos: a região a ~ 30 pc ao SW (observado nos modelos de $[\text{Si VI}]$) e outro a ~ 50 pc ao NE (observado nos modelos de $[\text{Ca VIII}]$).

Ao NE do AGN, constatamos que nuvens com densidades de 10^3 cm^{-3} descrevem a emissão observada na linha de $[\text{Ca VIII}]$. Porém, examinando o resultado para $[\text{Si VI}]$ com esta densidade, o cenário é o oposto, o que contradiz a hipótese de que a fotoionização explica a emissão observada em este caso. Uma análise similar pode ser realizada no caso da região ao SW do AGN observando os modelos de $[\text{Si VI}]$.

Para $[\text{S IX}]/\text{Pa}\beta$ não existe combinação de nuvens possíveis com as densidades usadas nos modelos para descrever os valores observados.

Embora a fotoionização pela fonte central seja o principal processo que alimente a região mais interna da NLR, os choques não podem ser omitidos. [Contini and Viegas \(2001\)](#) apresenta uma grade de modelos de choques acoplados aos efeitos da fotoionização pelo AGN. Observando as previsões dos modelos com choques, vemos que para regiões afastadas do núcleo os modelos com velocidades de choque de algumas centenas de km/s produzem valores ~ 5.4 no caso de $[\text{Si VI}]/\text{Br}\gamma$, compatível com os valores medidos.

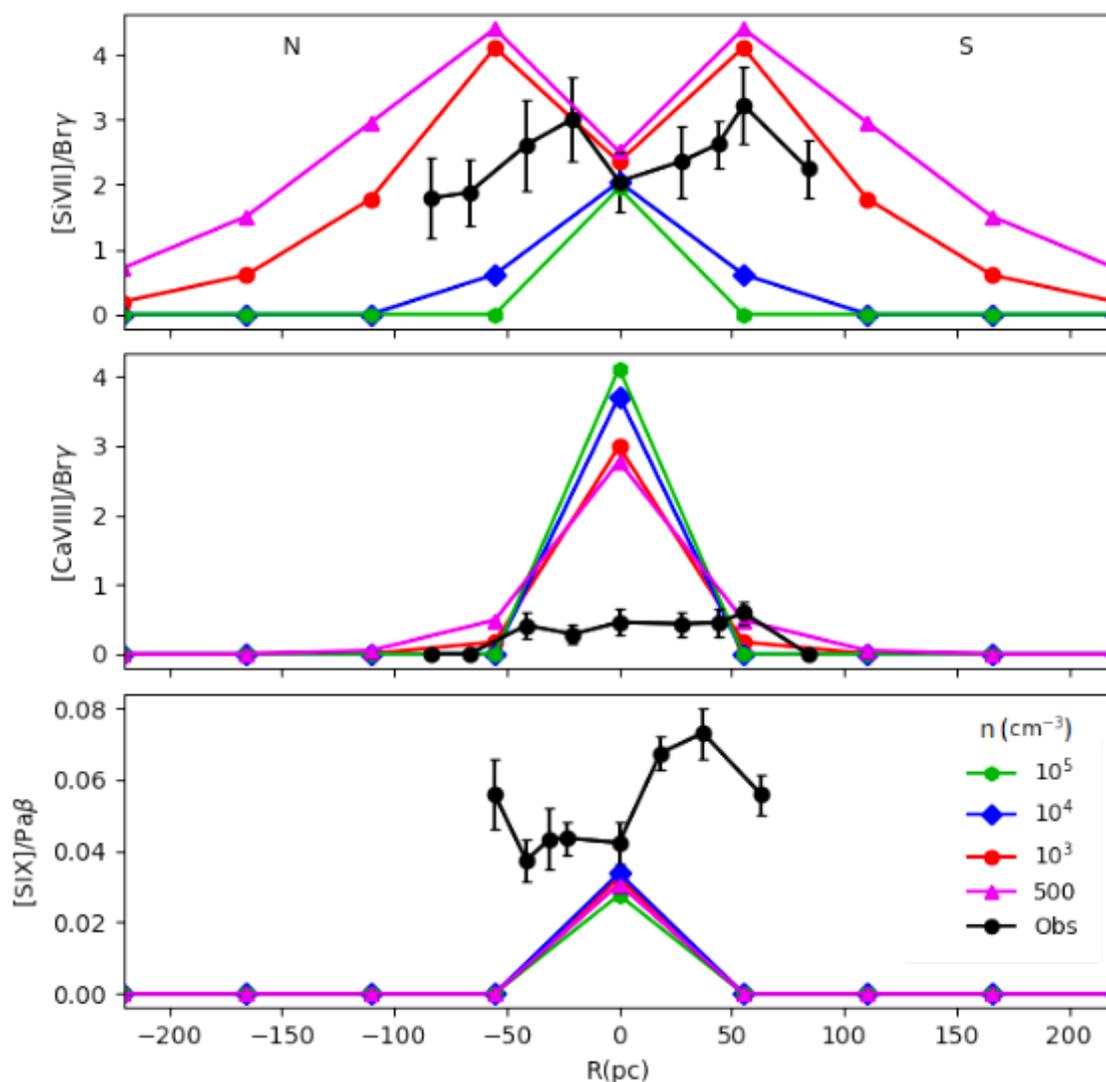
5.2 NGC4151

Neste caso foi usada a luminosidade $L_{\text{Bol}}=7.4 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ ([CRENSHAW et al., 2015](#)). Na figura 5.2 observamos os modelos CLOUDY para $[\text{Si VII}]/\text{Br}\gamma$, $[\text{Ca VIII}]/\text{Br}$ e $[\text{S IX}]/\text{Pa}\beta$ junto com os valores observados em esta galáxia.

No caso de $[\text{Si VII}]/\text{Br}\gamma$ vemos que os modelos de altas densidades não conseguem descrever a emissão observada. Porém, modelos com densidades menores ou uma combinação destes poderiam explicar as observações.

O cenário para $[\text{Ca VIII}]/\text{Br}$ é o mesmo que o observado no caso da galáxia NGC1068. Os modelos de fotoionização pela fonte central sobre-estimam os valores medidos.

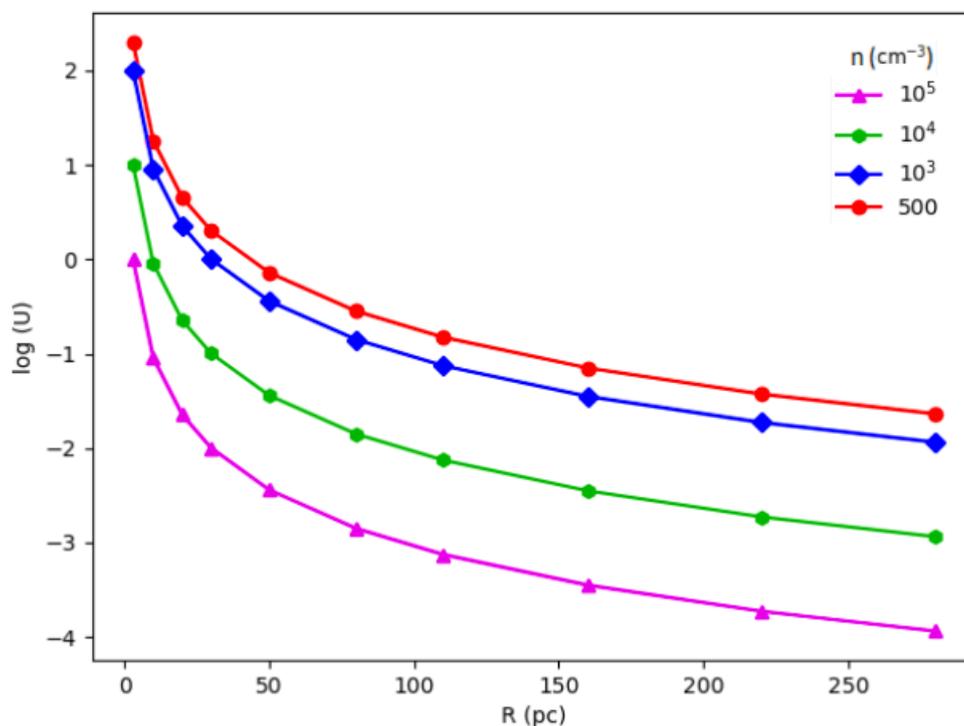
Figura 5.2 - Predições dos modelos CLOUDY vs observações para NGC4151.



Fonte: Produção do autor.

Observamos que para a razão de $[S\text{IX}]/Pa\beta$ os modelos não conseguem reproduzir os valores observados fora do núcleo. Na região central, densidades de 10^4 cm^{-3} ou mais conseguem descrever os valores observados. Sistemáticamente, $[S\text{IX}]/Pa\beta \gg$ modelos, isto pode-se dever ao fato de que as bases de dados atômicos de CLOUDY precisam ser atualizadas. Encontramos que em NGC 4151 a fotoionização de nuvens com densidade de 10^4 ou 10^5 cm^{-3} é o mecanismo responsável pela emissão observada no núcleo da galáxia. Fora do núcleo, fotoionização de nuvens de baixa densidade (500 e 10^3 cm^{-3}) descreve parcialmente os dados coletados.

Figura 5.3 - Log(U) em função da distância para NGC4151



Fonte: Produção do autor.

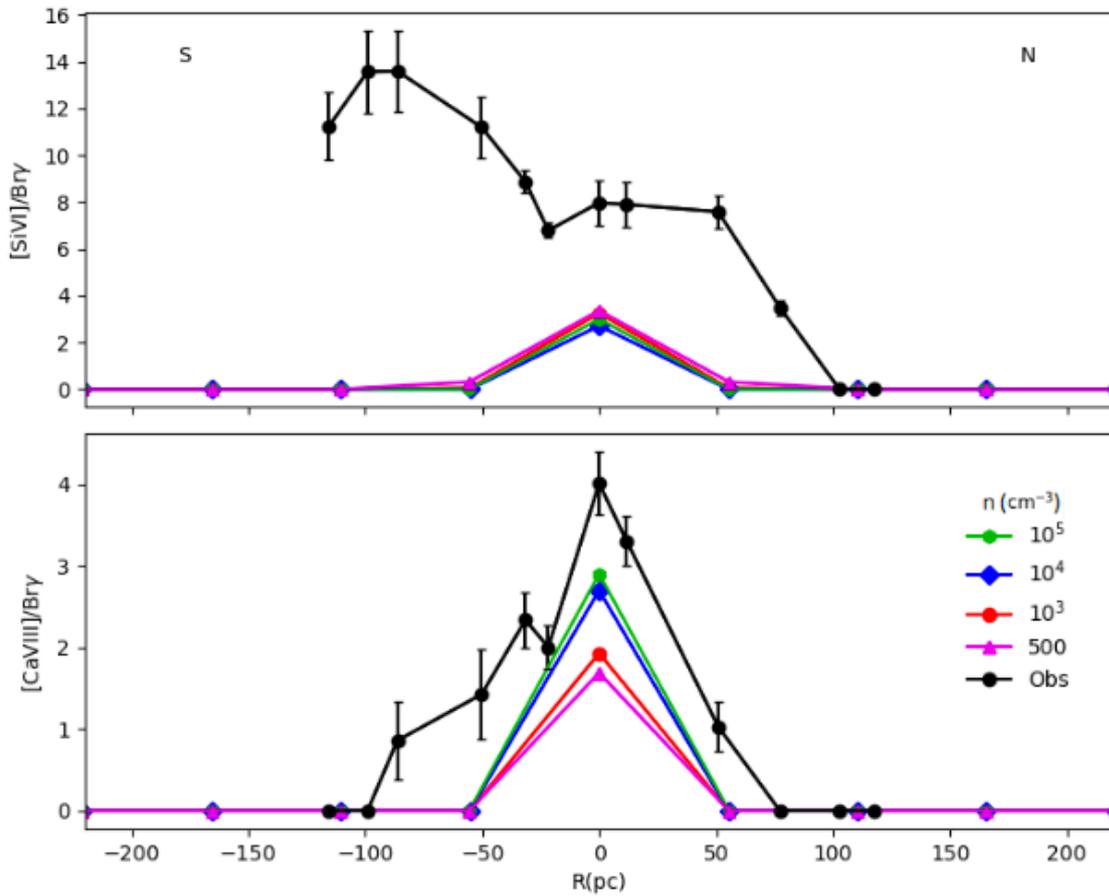
De modo geral, vemos que nos modelos nuvens de alta densidade ($n_H > 10^4 \text{ cm}^{-3}$) produzem regiões de emissão confinadas aos 50pc centrais e alcançam o máximo em emissão no núcleo. O parâmetro de ionização para nuvens com estas densidades está dentro das condições esperadas da NLR, tal como pode ser observado na figura 5.3. Mas não descreve corretamente os valores medidos em regiões fora do núcleo. Em contraste, nuvens com densidades mais baixas ($n_H = 500$ e 10^3 cm^{-3}) emitem silício em até 200 parsecs do AGN (cenário que concorda com as observações). No entanto, nos parsecs mais internos, o parâmetro de ionização para essas nuvens é até duas ordens de grandeza superiores às esperadas para a NLR. Isto gera uma contradição e portanto, fotoionização de nuvens com estas densidades não reproduz a emissão observada.

5.3 NGC1386

Neste caso foi usada a luminosidade $L_{\text{Bol}} = 2.99 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ (RODRÍGUEZ-ARDILA et al., 2017). Na figura 5.4 observamos as previsões dos modelos CLOUDY para $[\text{Si VI}]/\text{Br}\gamma$, $[\text{Ca VIII}]/\text{Br}\gamma$ junto com as observações.

Em ambas as razões, os modelos de fotoionização não traçam as razões observadas. Particularmente, um ponto observacional em ~ 25 pc ao S nos modelos de cálcio consegue ser descrito pela fotoionização com densidades de 10^5 cm^{-3} . Observando o mesmo ponto no modelo de Silício este não consegue ser descrito pelos modelos, por tanto isto gera uma contradição e com isto pode-se concluir que em este caso só a fotoionização não é capaz de explicar as razões de linhas observadas.

Figura 5.4 - Predições dos modelos CLOUDY vs observações para NGC1386



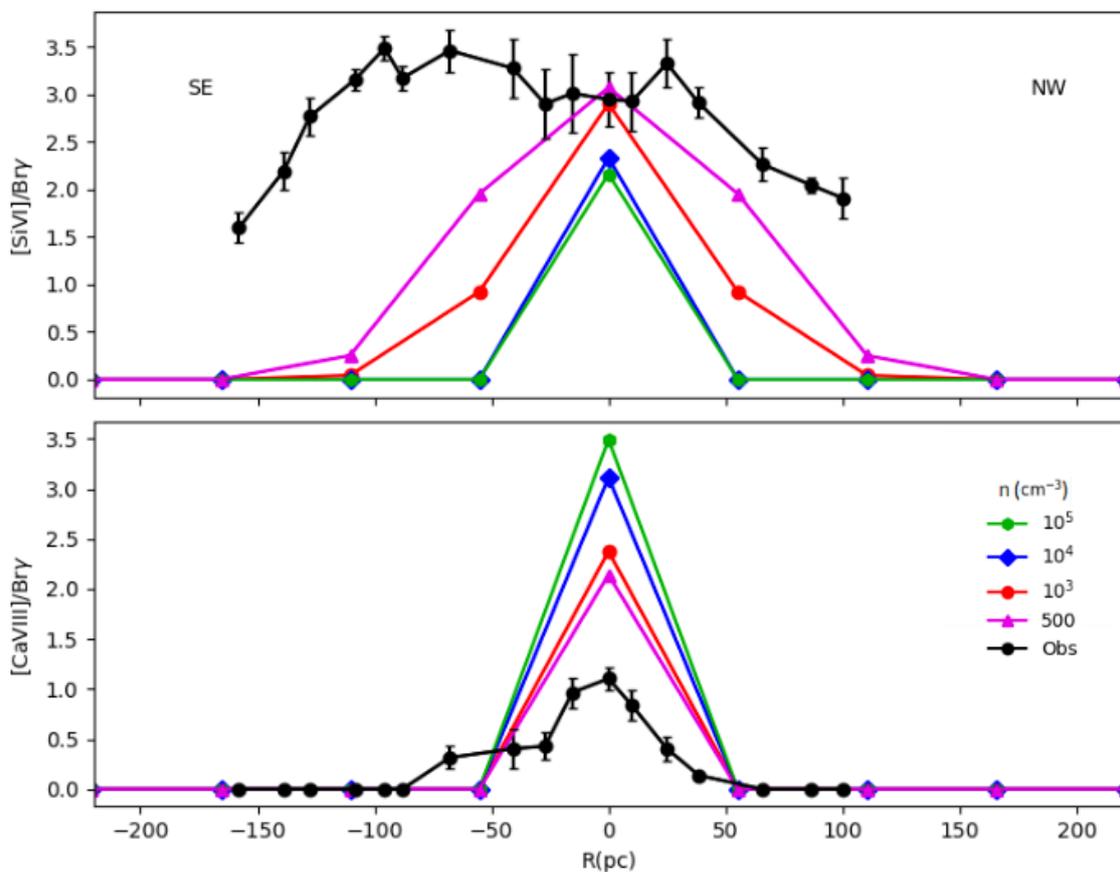
Fonte: Produção do autor.

Usando os modelos de [Contini and Viegas \(2001\)](#) considerando choques e fotoionização acoplados, observamos que para as regiões mais afastadas do núcleo, modelos com velocidades pre-choque de 100 km s^{-1} gera valores para a razão de $[\text{Si VI}]/\text{Br}\gamma$ de ~ 14.5 . Portanto, para esta galáxia, os choques tem um papel importante na emissão de alta ionização.

5.4 ESO428-G14

Pelo fato de que a luminosidade bolométrica desta galáxia não encontra-se publicada, neste trabalho usamos a luminosidade $L = 1.05 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$, que é a luminosidade nos raios X (??). Na figura 5.6 podemos ver os modelos de fotoionização e os valores observados.

Figura 5.5 - Predições dos modelos CLOUDY vs observações para ESO428-G14 com a luminosidade nos raios X de ??).



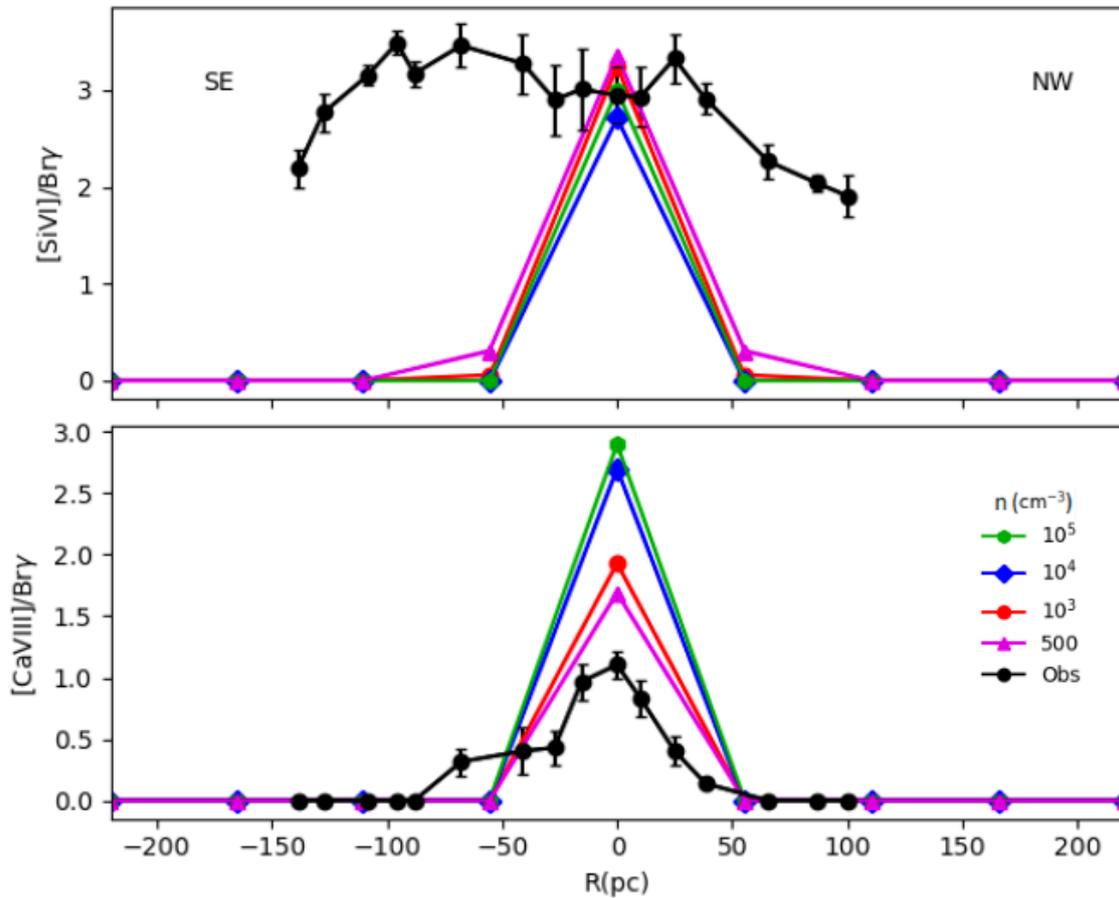
Fonte: Produção do autor.

Vemos que em este caso, a fotoionização descreve a emissão observada nos 50 pc centrais com densidades de 500 e 10^3 cm^{-3} . Para regiões mais afastadas do núcleo, a emissão não consegue ser descrita pelos modelos de fotoionização. No caso de nuvens com densidades menores à 500 cm^{-3} , os modelos de fotoionização conseguem reproduzir as razões observadas. Porém, modelos com densidades mais baixas não

tem sentido físico netos objetos astrofísicos.

Na figura 5.6 é usada a luminosidade bolométrica $L_{\text{Bol}}=3\times 10^{42}$ erg s⁻¹ (Juán Antonio Ontivero, Comunicação privada) calculada integrando a emissão nos Raios-X e MIR. Vemos, que neste caso, o cenário é igual ao apresentado na figura 5.5. Ainda usando uma luminosidade 5 vezes menor, não existe combinação de nuvens fotoionizadas pela fonte central com densidades entre 500 e 10⁵ cm⁻³ que conseguem descrever as razões de linhas observadas.

Figura 5.6 - Predições dos modelos CLOUDY vs observações para ESO428-G14



Fonte: Produção do autor.

Comparamos dois cenários com duas luminosidades extremas e observamos que a fotoionização não consegue descrever a emissão observada para distâncias maiores que 50 pc do núcleo. Estimativas da densidade do gás realizadas com as razões de

linhas [S II] λ 6717/6731 (D. May et al in prep.) mostram que esta galáxia apresenta uma densidade de 2110 cm^{-3} a $\sim 200 \text{ pc}$ ao SE do núcleo e de 800 cm^{-3} na direção NW para uma distância de $\sim 150 \text{ pc}$ do AGN. Portanto, observando a figuras 5.5 e 5.6 um gás fotoionizado pela fonte central com essas densidades não consegue reproduzir a emissão observada. A estreita relação entre a emissão do gás de alta ionização e o jato faz plausível o cenário dos choques localizados, entre o ISM e o jato rádio para explicar a emissão. Observando os modelos de Contini and Viegas (2001) vemos que, modelos de choques com velocidades de algumas centenas de km/s conseguem reproduzir razões de linha de [Si VI]/Br γ de ~ 3 para regiões mais afastadas do núcleo, em acordo com os valores medidos.

Em resumo, CLOUDY suporta um cenário onde a fotoionização pela fonte central alimenta a emissão coronal nos 50 pc centrais. Para distâncias maiores, valores atípicos para a densidade do gás devem ser assumidas para que este mecanismo seja capaz de reproduzir a emissão coronal observada.

5.5 Fotoionização pela fonte central vs Choques

A origem de uma linha depende de diversos fatores, tais como a matéria do meio onde ela é produzida e os mecanismos energéticos envolvidos. O estudo dessas linhas, portanto, pode ajudar na compreensão dos processos físicos, da cinemática e na caracterização do meio no qual surgem. As linhas coronais possuem altos potenciais de ionização. Portanto, estão associadas a processos altamente energéticos. O estudo das razões de fluxos destas linhas permite obter informação sobre a origem e o meio em que elas surgem. Dois mecanismos têm sido sugeridos como fontes de excitação das CLs:

- a) Um gás fotoionizado por raios-X emitidos pela fonte central
- b) Choques de nuvens de altas velocidades na região nuclear.
- c) Uma terceira hipótese indica a presença simultânea de ambos os processos.

Pelo observado nos modelos de fotoionização descritos acima, a fotoionização não é o único mecanismo envolvido na produção das linhas de alta ionização. A evidência observacional favorece a hipótese da presença simultânea de ambos os processos (choques+fotoionização). Além disso, a boa correlação entre a emissão de linhas de alta ionização e a emissão rádio dá suporte adicional para esse cenário.

Alternativamente, uma série de trabalhos (DOPITA; SUTHERLAND, 1995; DOPITA M.; SUTHERLAND, 1996; ALLEN et al., 1999) têm proposto o mecanismo de choques auto-ionizantes como uma alternativa para o paradigma da fotoionização como mecanismo dominante na produção das linhas de emissão da NLR. Estes modelos de choques estão parametrizados pela velocidade do choque e pelo valor do campo magnético. A velocidade do choque controla a forma do espectro ionizante produzido pelo choque, enquanto que o parâmetro magnético controla o parâmetro de ionização efetivo na zona de choque. Estes modelos de choques auto-ionizantes teriam a energia requerida para a produção das linhas quando a velocidade $v > 150$ km/s, gerando um intenso campo de radiação UV na zona posterior ao “frente” de choque. Para velocidades de choque maiores que 175 km/s, este “reservatório” de fótons UV seria então responsável pela fotoionização do gás na “frente” do choque. A forma da distribuição de energia assumida por este campo de radiação UV seria regulada pela velocidade do choque. Tais modelos de choques propostos por Dopita and Sutherland (1995), Dopita M. and Sutherland (1996) se contrapõem aos modelos de choques “puros” pela ausência, nestes últimos, de um mecanismo adicional ao de choques.

A região das linhas estreitas dos AGNs possui uma estrutura complexa. Como foi observado no capítulo 4, nuvens com velocidades altas coexistem com nuvens com velocidades mais baixas. Por outro lado, a intensidade da radiação proveniente do núcleo atinge as nuvens da NLR. Embora este campo de radiação diminua com a distância, não pode ser simplesmente ignorado. Verificamos que a medida que nos afastamos do núcleo da galáxia, as razões de linhas tendem a ser descritas por fotoionização pela fonte central e choques, enquanto que na região mais próxima do AGN, a fotoionização pela fonte central continua sendo o mecanismo dominante de ionização do gás.

6 CONCLUSÕES

Quando se inicia um trabalho de pesquisa, o objetivo principal é sempre responder um conjunto concreto de perguntas. No entanto, a medida que o estudo progride, rapidamente vemos que as respostas originam novas perguntas, as quais motivam para continuar pesquisando. Este trabalho não é exceção. Estudamos as regiões mais internas de uma amostra de AGNs a partir da análise da emissão das CLs. A região onde são emitidas as CLs é próxima à fonte central e, portanto, proporciona informação importante sobre os processos energéticos que ocorrem no centro dos AGNs. A presença das CLs nos espectros de AGNs é um fato bem conhecido. O conhecimento da origem desta emissão, porém, tem sido limitado pela extensão das regiões em que são emitidas, as quais geralmente não podem ser resolvidas com telescópios limitados por *seeing*. Por causa disto, um avanço importante na compreensão da origem destas linhas é possível usando espectroscopia de alta resolução espacial. A seguir, apresentamos os principais resultados e conclusões derivados deste trabalho:

- As CLs são emitidas em regiões estendidas, até 150-200 pc do núcleo.
- Em geral, os perfis das CLs apresentam fortes assimetrias que mudam com a distância ao núcleo. Em vários casos, são observadas linhas com múltiplas componentes, claramente separadas, que contribuem localmente na complexidade de seus perfis.
- As CLs são emitidas por gás em um grande intervalo de velocidades, atingindo valores relativos à velocidade sistêmicas da galáxia de até 1000 km s^{-1} . Isso reflete claramente a turbulência do meio na qual são geradas.
- A partir da comparação dos mapas de emissão e as tomografias com a emissão rádio, foi verificado que a morfologia e a cinemática do gás emissor de CLs estão fortemente correlacionadas com o jato rádio.
- As CLs seguem um padrão de velocidade que não é consistente com o cenário de um gás em rotação.
- Observamos variações em largura e posição dos perfis das linhas entre um ponto e outro ao longo de uma direção espacial, sem seguir uma tendência em particular. Porém, o gás mostra-se altamente turbulento nas regiões onde existem nódulos de emissão rádio.
- As evidências encontradas sugerem que a fotoionização pela fonte central não pode explicar a emissão de linhas coronais. Mecanismos adicionais, como os choques,

desempenham um papel importante na formação de linhas de alta ionização.

Da análise realizada anteriormente é evidente que o uso de observações com alta resolução espacial permitem obter uma visão privilegiada dos processos físicos envolvidos na emissão observada em AGNs. O uso da espectroscopia IFU conjuntamente com o sistema de óptica adaptativa é cada vez mais usual, revelando com detalhe as partes mais internas das galáxias ativas.

6.0.1 Perspectivas

Os dados IFUs precisam de técnicas de redução e análise complexas, que na atualidade não foram completamente desenvolvidas. A falta de ferramentas para realizar a análise de tal quantidade de informação de maneira rápida e eficaz é o primeiro obstáculo no começo da manipulação deste tipo de dados. Para realizar o trabalho aqui apresentado desenvolvemos códigos em python que possibilitam a criação dos mapas das linhas em emissão e os mapas de canais para cubos de dados. Estes ainda podem ser melhorados, incluindo, por exemplo, interfaces que permitam que os dados sejam manipulados individualmente quando necessário. Espera-se que uma versão estendida desses códigos seja disponibilizada para a comunidade astronômica.

Realizar modelos de fotoionização acoplados com choques para quantificar a contribuição associada a cada fenômeno físico incluindo uma amostra maior de galáxias precisam ser realizados para assim obter uma visão mais clara dos processos físicos relacionados ao mecanismo central.

Portanto, é necessário expandir este trabalho para outros objetos com o intuito de obter um cenário físico mais completo da cinemática, excitação e distribuição do gás ao redor do núcleo ativo. Particularmente, é importante adicionar galáxias Seyfert tipo 1 para confirmar que as propriedades observadas nas CLs não dependem de efeitos de orientação. Com isto, espera-se encontrar mais correlações reveladoras entre o processo de *feeding-feedback* em AGNs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, M.; SUTHERLAND, R.; DOPITA, M.; KEWLEY, L.; GROVES, B.
Radiative shock models for the nlr of agn: Predictions up to 1000 km s⁻¹. In: **The Interplay Among Black Holes, Stars and ISM in Galactic Nuclei**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 222, p. 305–306. 15

ALLEN, M. G.; DOPITA, M. A.; TSVETANOV, Z. I.; SUTHERLAND, R. S.
Physical conditions in the seyfert galaxy ngc 2992. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 511, n. 2, p. 686, 1999. 85

ALLINGTON-SMITH, J.; CONTENT, R.; HAYNES, R.; ROBERTSON, D.
Integral field spectroscopy with gemini and space telescopes. In: **Imaging the Universe in Three Dimensions**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 195, p. 319. 18

ANTONUCCI, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. **Annual review of astronomy and astrophysics**, v. 31, p. 473–521, 1993. 6, 7, 9

ANTONUCCI, R.; MILLER, J. Spectropolarimetry and the nature of ngc 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 297, p. 621–632, 1985. 6, 7

ARRIBAS, S.; MEDIAVILLA, E.; GARCIA-LORENZO, B. Biconical radiation field and outflow in ngc 1068: Location of the hidden nucleus. **The Astrophysical Journal**, v. 463, p. 509, 1996. 26

BARBOSA, F. K. B.; STORCHI-BERGMANN, T.; FERNANDES, R. C.; WINGE, C.; SCHMITT, H. Gemini/gmos ifu gas velocity ‘tomography’ of the narrow line region of nearby active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 396, n. 1, p. 2–18, 2009. 14, 75

BARTH, A. J.; FILIPPENKO, A. V.; MORAN, E. C. Polarized broad-line emission from low-luminosity active galactic nuclei. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 525, n. 2, p. 673, 1999. 5

BEDREGAL, A. G.; COLINA, L.; ALONSO-HERRERO, A.; ARRIBAS, S.
Near-ir integral field spectroscopy study of the star formation and agn of the lirr ngc 5135. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 698, n. 2, p. 1852, 2009. 13

- BENNERT, N.; JUNGWIERT, B.; KOMOSSA, S.; HAAS, M.; CHINI, R. Size and properties of the nlr in the seyfert-2 galaxy ngc 1386. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 446, n. 3, p. 919–932, 2006. 29
- BERGVALL, N.; JOHANSSON, L.; OLOFSSON, K. Eso 428-g 14-a new seyfert 2 galaxy. **Astronomy and Astrophysics**, v. 166, p. 92–96, 1986. 30
- BINETTE, L.; WILSON, A. S.; RAGA, A.; STORCHI-BERGMANN, T. Photoionization of very high excitation gas in the circinus galaxy and other active galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v. 327, p. 909–920, 1997. 11
- CAPPELLARI, M. ppxf: Penalized pixel-fitting stellar kinematics extraction. **Astrophysics Source Code Library**, 2012. 23
- CECIL, G.; DOPITA, M. A.; GROVES, B.; WILSON, A. S.; FERRUIT, P.; PÉCONTAL, E.; BINETTE, L. Spatial Resolution of High-Velocity Filaments in the Narrow-Line Region of NGC 1068: Associated Absorbers Caught in Emission? , v. 568, p. 627–638, apr. 2002. 26, 40
- COMBES, F. Models of agn feedback. **Proceedings of the International Astronomical Union**, Cambridge University Press, v. 10, n. S309, p. 182–189, 2014. 15
- CONTINI, M.; PRIETO, M. A.; VIEGAS, S. M. Gas and dust emission from the nuclear region of the circinus galaxy. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 505, n. 2, p. 621, 1998. 15
- CONTINI, M.; VIEGAS-ALDROVANDI, S. Continuum radiation from active galactic nuclei. **The Astrophysical Journal**, v. 350, p. 125–131, 1990. 15
- CONTINI, M.; VIEGAS, S. A grid of composite models for the simulation of the emission-line spectra from the narrow-line regions of active galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, IOP Publishing, v. 132, n. 2, p. 211, 2001. 78, 81, 84
- COOKE, B.; ELVIS, M.; MACCACARO, T.; WARD, M.; FOSBURY, R.; PENSTON, M. Ngc 3783: A possible x-ray emitting seyfert galaxy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 177, n. 1, p. 121P–125P, 1976. 11
- CRACCO, V.; CIROI, S.; MILLE, F. D.; VAONA, L.; FRASSATI, A.; SMIRNOVA, A.; MURA, G. L.; MOISEEV, A.; RAFANELLI, P. The origin of gas

in extended narrow-line regions of nearby seyfert galaxies–i. ngc 7212. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 418, n. 4, p. 2630–2641, 2011. 10

CRENSHAW, D.; KRAEMER, S.; HUTCHINGS, J.; II, L. B.; GULL, T.; KAISER, M.; NELSON, C.; RUIZ, J.; WEISTROP, D. A kinematic model for the narrow-line region in ngc 4151. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 120, n. 4, p. 1731, 2000. 56

CRENSHAW, D.; KRAEMER, S.; HUTCHINGS, J.; DANKS, A.; GULL, T.; KAISER, M.; NELSON, C.; WEISTROP, D. Space telescope imaging spectrograph echelle observations of ngc 4151: Variable ionization of the intrinsic uv absorbers. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 545, n. 1, p. L27, 2000. 28, 57

CRENSHAW, D. M.; FISCHER, T. C.; KRAEMER, S. B.; SCHMITT, H. R. Feedback from mass outflows in nearby active galactic nuclei. ii. outflows in the narrow-line region of ngc 4151. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 799, n. 1, p. 83, 2015. 21, 78

CRENSHAW, D. M.; KRAEMER, S. B. Resolved spectroscopy of the narrow-line region in ngc 1068. i. the nature of the continuum emission. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 532, n. 1, p. 247, 2000. 25

CRENSHAW D. M., M.; KRAEMER, S. B. Resolved spectroscopy of the narrow-line region in ngc 1068: Kinematics of the ionized gas. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 532, n. 2, p. L101, 2000. 26

DAS, V.; CRENSHAW, D.; HUTCHINGS, J.; DEO, R.; KRAEMER, S.; GULL, T.; KAISER, M.; NELSON, C.; WEISTROP, D. Mapping the kinematics of the narrow-line region in the seyfert galaxy ngc 4151. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 130, n. 3, p. 945, 2005. 28, 57, 75

DAS, V.; CRENSHAW, D.; KRAEMER, S.; DEO, R. Kinematics of the narrow-line region in the seyfert 2 galaxy ngc 1068: Dynamical effects of the radio jet. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 132, n. 2, p. 620, 2006. 21, 26, 48, 75, 77

DOPITA, M. A.; SUTHERLAND, R. S. Spectral signatures of fast shocks. ii. optical diagnostic diagrams. **The Astrophysical Journal**, v. 455, p. 468, 1995. 15, 85

DOPITA M., M. A.; SUTHERLAND, R. S. Spectral signatures of fast shocks. i. low density model grid. **The Astrophysical Journal**, v. 102, p. 161, 1996. 85

DULLEMOND, C.; BEMMEL, I. V. Clumpy tori around active galactic nuclei. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 436, n. 1, p. 47–56, 2005. 7

ERKENS, U.; APPENZELLER, I.; WAGNER, S. The nature of the ffil winds from agn. **Astronomy and Astrophysics**, v. 323, p. 707–716, 1997. 12, 14

EVANS, I. Nuclear emission-line intensities and profiles in ngc 3783. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 67, p. 373–402, 1988. 12, 35

EVANS, I.; TSVETANOV, Z.; KRISS, G.; FORD, H.; CAGANOFF, S.; KORATKAR, A. Hubble space telescope imaging of the narrow-line region of ngc 4151. **The Astrophysical Journal**, v. 417, p. 82, 1993. 26, 27

FALCKE, H. Jets in agn new results from hst and vla. **arXiv preprint astro-ph/9802238**, 1998. 75

FALCKE, H.; WILSON, A. S.; SIMPSON, C. Hubble space telescope and vla observations of seyfert 2 galaxies: the relationship between radio ejecta and the narrow-line region. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 502, n. 1, p. 199, 1998. 30, 66

FALCKE, H.; WILSON, A. S.; SIMPSON, C.; BOWER, G. A. Helical strands in the jetlike narrow-line region of eso 428-g14. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 470, n. 1, p. L31, 1996. 21, 30, 67

FERGUSON, J. W.; KORISTA, K. T.; FERLAND, G. J. Physical conditions of the coronal line region in seyfert galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, IOP Publishing, v. 110, n. 2, p. 287, 1997. 11, 15, 48

FERLAND, G.; CHATZIKOS, M.; GUZMÁN, F.; LYKINS, M.; HOOF, P. van; WILLIAMS, R.; ABEL, N.; BADNELL, N.; KEENAN, F.; PORTER, R. et al. The 2017 release of cloudy. **arXiv preprint arXiv:1705.10877**, 2017. 41, 76

FERLAND, G. J.; OSTERBROCK, D. Iue spectra and a resulting model of seyfert 2 galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 300, p. 658–668, 1986. 6

FERRARESE, L.; MERRITT, D. A fundamental relation between supermassive black holes and their host galaxies. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 539, n. 1, p. L9, 2000. 14

FRITZ, J.; FRANCESCHINI, A.; HATZIMINAOGLOU, E. Revisiting the infrared spectra of active galactic nuclei with a new torus emission model. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 366, n. 3, p. 767–786, 2006. 7

GALLIANO, E.; ALLOIN, D. Near-ir 2d-spectroscopy of the 4" × 4" region around the active galactic nucleus of ngc 1068 with isaac/vlt. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 393, n. 1, p. 43–56, 2002. 45

GALLIMORE, J.; BAUM, S.; O'DEA, C. P.; PEDLAR, A. The subarcsecond radio structure in ngc 1068. i. observations and results. **The Astrophysical Journal**, v. 458, p. 136, 1996. 48

GASKELL, C. M.; GOOSMANN, R. W. Line shifts, broad-line region inflow, and the feeding of active galactic nuclei. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 769, n. 1, p. 30, 2013. 15

GEBALLE, T.; MASON, R.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; AXON, D. The 3–5 μm spectrum of ngc 1068 at high angular resolution: Distribution of emission and absorption features across the nuclear continuum source. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 701, n. 2, p. 1710, 2009. 46

GELBORD, J.; MULLANEY, J.; WARD, M. Galaxies selected from the sdss by forbidden high-ionization emission lines. In: **Bulletin of the American Astronomical Society**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 41, p. 333. 11

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**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 406, n. 1, p. 597–611, 2010. 14

GRANATO, G.; DANESE, L. Thick tori around active galactic nuclei: a comparison of model predictions with observations of the infrared continuum and silicate features. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 268, n. 1, p. 235–252, 1994. 7

GRANDI, S. Fe xi λ 7892 emission in seyfert galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 221, p. 501–506, 1978. 11

GREVESSE, N.; ASPLUND, M.; SAUVAL, A.; SCOTT, P. The chemical composition of the sun. **Canadian Journal of Physics**, NRC Research Press, v. 89, n. 4, p. 327–331, 2011. 42, 76

HECKMAN, T.; MILEY, G.; GREEN, R. The kinematics of the narrow-line region in active galaxies and quasars. iii-correlations with the broad-line region and radio emission. **The Astrophysical Journal**, v. 281, p. 525–534, 1984. [10](#)

HECKMAN, T. M. An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies-activity in normal galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v. 87, p. 152–164, 1980. [4](#)

HO, L. C. Nuclear activity in nearby galaxies. **Annu. Rev. Astron. Astrophys.**, Annual Reviews, v. 46, p. 475–539, 2008. [1](#), [2](#), [4](#)

HO, L. C.; PENG, C. Y. Nuclear luminosities and radio loudness of seyfert nuclei. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 555, n. 2, p. 650, 2001. [5](#)

HOLT, J.; TADHUNTER, C.; MORGANTI, R.; BELLAMY, M.; DELGADO, R. G.; TZIOUMIS, A.; INSKIP, K. 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**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 370, n. 4, p. 1633–1650, 2006. [11](#)

HUTCHINGS, J.; CRENSHAW, D.; DANKS, A.; GULL, T.; KRAEMER, S.; NELSON, C.; WEISTROP, D.; KAISER, M.; JOSEPH, C. High-velocity line emission in the narrow-line region of ngc 4151. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 118, n. 5, p. 2101, 1999. [28](#), [57](#)

HUTCHINGS, J.; CRENSHAW, D.; KAISER, M.; KRAEMER, S.; WEISTROP, D.; BAUM, S.; BOWERS, C.; FEINBERG, L.; GREEN, R.; GULL, T. et al. Gas cloud kinematics near the nucleus of ngc 4151. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 492, n. 2, p. L115, 1997. [xvi](#), [53](#), [56](#)

JENSEN, J. B.; TONRY, J. L.; BARRIS, B. J.; THOMPSON, R. I.; LIU, M. C.; RIEKE, M. J.; AJHAR, E. A.; BLAKESLEE, J. P. Measuring distances and probing the unresolved stellar populations of galaxies using infrared surface brightness fluctuations. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 583, n. 2, p. 712, 2003. [28](#)

KHACHIKIAN, E. Y.; WEEDMAN, D. W. An atlas of seyfert galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 192, p. 581–589, 1974. [3](#), [24](#)

KOMOSSA, S.; FINK, H. Evidence for a dusty warm absorber in ngc 3227? **arXiv preprint astro-ph/9707003**, 1997. [11](#)

KOMOSSA, S.; SCHULZ, H. Interpretation of the emission line spectra of seyfert 2 galaxies by multi-component photoionization models. **arXiv preprint astro-ph/9701001**, 1997. 11

KOMOSSA, S.; XU, D.; ZHOU, H.; STORCHI-BERGMANN, T.; BINETTE, L. On the nature of seyfert galaxies with high [o iii] λ 5007 blueshifts. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 680, n. 2, p. 926, 2008. 11

KORISTA, K.; FERLAND, G. The origin of coronal lines in seyfert galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 343, p. 678–685, 1989. 11

KRAEMER, S. B.; CRENSHAW, D. M. Resolved spectroscopy of the narrow-line region in ngc 1068. iii. physical conditions in the emission-line gas. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 544, n. 2, p. 763, 2000. 46, 76

LENA, D.; ROBINSON, A.; STORCHI-BERGMAN, T.; SCHNORR-MÜLLER, A.; SEELIG, T.; RIFFEL, R. A.; NAGAR, N. M.; COUTO, G. d. S.; SHADLER, L. The complex gas kinematics in the nucleus of the seyfert 2 galaxy ngc 1386: rotation, outflows, and inflows. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 806, n. 1, p. 84, 2015. 29, 61, 64

MACCHETTO, F.; CAPETTI, A.; SPARKS, W.; AXON, D.; BOKSENBERG, A. Hst/foc imaging of the narrow-line region of ngc 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 435, p. L15–L18, 1994. 26, 47

MALKAN, M. A.; GORJIAN, V.; TAM, R. A hubble space telescope* imaging survey of nearby active galactic nuclei. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, IOP Publishing, v. 117, n. 1, p. 25, 1998. 28

MARTINS, L. P.; RIFFEL, R.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; GRUENWALD, R.; SOUZA, R. D. Nuclear and extended spectra of ngc 1068–ii. near-infrared stellar population synthesis. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 406, n. 4, p. 2185–2192, 2010. 24

MASON, R. E.; GEBALLE, T.; PACKHAM, C.; LEVENSON, N.; ELITZUR, M.; FISHER, R.; PERLMAN, E. Spatially resolved mid-infrared spectroscopy of ngc 1068: The nature and distribution of the nuclear material. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 640, n. 2, p. 612, 2006. 46

MATHEWS, W. G.; FERLAND, G. J. What heats the hot phase in active nuclei? **The Astrophysical Journal**, v. 323, p. 456–467, 1987. 41, 76

MAZZALAY, X.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; KOMOSSA, S. Demystifying the coronal-line region of active galactic nuclei: spatially resolved spectroscopy with the hubble space telescope. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 405, n. 2, p. 1315–1338, 2010. [12](#), [13](#), [40](#), [47](#), [65](#)

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**, Oxford University Press, v. 430, n. 3, p. 2411–2426, 2013. [13](#), [28](#), [45](#), [50](#), [65](#)

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. et al. Gemini near-infrared integral field spectrograph (nifs). In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Instrument design and performance for optical/infrared ground-based telescopes**. [S.l.], 2003. v. 4841, p. 1581–1592. [20](#), [22](#)

MCLURE, R.; KUKULA, M.; DUNLOP, J.; BAUM, S.; O'DEA, C.; HUGHES, D. A comparative hst imaging study of the host galaxies of radio-quiet quasars, radio-loud quasars and radio galaxies—i. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 308, n. 2, p. 377–404, 1999. [6](#)

MILLER, J. S.; ANTONUCCI, R. R. Evidence for a highly polarized continuum in the nucleus of ngc 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 271, p. L7–L11, 1983. [6](#)

MORGANTI, R.; HOLT, J.; SARIPALLI, L.; OOSTERLOO, T.; TADHUNTER, C. Ic 5063: Agn driven outflow of warm and cold gas. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 476, n. 2, p. 735–743, 2007. [75](#)

MORISSET, C. pycloudy: Tools to manage astronomical cloudy photoionization code. **Astrophysics Source Code Library**, 2013. [42](#)

MORTLOCK, D. J.; WARREN, S. J.; VENEMANS, B. P.; PATEL, M.; HEWETT, P. C.; MCMAHON, R. G.; SIMPSON, C.; THEUNS, T.; GONZÁLES-SOLARES, E. A.; ADAMSON, A. et al. A luminous quasar at a redshift of $z=7.085$. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 474, n. 7353, p. 616, 2011. [2](#)

MULLANEY, J.; ALEXANDER, D.; GOULDING, A.; HICKOX, R. C. Defining the intrinsic agn infrared spectral energy distribution and measuring its

contribution to the infrared output of composite galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 414, n. 2, p. 1082–1110, 2011. 11

MULLANEY, J.; WARD, M.; DONE, C.; FERLAND, G. J.; SCHURCH, N. The location and kinematics of the coronal-line emitting regions in active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 394, n. 1, p. L16–L20, 2009. 14

MULLANEY, J. R.; WARD, M. J. Optical emission-line properties of narrow-line seyfert 1 galaxies and comparison active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 385, n. 1, p. 53–74, 2008. 11

MÜLLER-SÁNCHEZ, F.; PRIETO, M.; HICKS, E.; VIVES-ARIAS, H.; DAVIES, R.; MALKAN, M.; TACCONI, L.; GENZEL, R. Outflows from active galactic nuclei: kinematics of the narrow-line and coronal-line regions in seyfert galaxies. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 739, n. 2, p. 69, 2011. 10, 14, 15, 20, 22, 65

MUNDELL, C.; FERRUIT, P.; NAGAR, N.; WILSON, A. Radio variability in seyfert nuclei. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 703, n. 1, p. 802, 2009. 29, 61, 63

MUNDELL, C.; PEDLAR, A.; BAUM, S.; O'DEA, C.; GALLIMORE, J.; BRINKS, E. Merlin observations of neutral hydrogen absorption in the seyfert nucleus of ngc 4151. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 272, n. 2, p. 355–362, 1995. 54, 57

NAGAO, T.; TANIGUCHI, Y.; MURAYAMA, T. High-ionization nuclear emission-line region of seyfert galaxies. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 119, n. 6, p. 2605, 2000. 11

NENKOVA, M.; IVEZIĆ, Ž.; ELITZUR, M. Dust emission from active galactic nuclei. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 570, n. 1, p. L9, 2002. 7

ONKEN, C. A.; VALLURI, M.; BROWN, J. S.; MCGREGOR, P. J.; PETERSON, B. M.; BENTZ, M. C.; FERRARESE, L.; POGGE, R. W.; VESTERGAARD, M.; STORCHI-BERGMANN, T. et al. The black hole mass of ngc 4151. ii. stellar dynamical measurement from near-infrared integral field spectroscopy. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 791, n. 1, p. 37, 2014. 21

OSTERBROCK, D. Seyfert galaxies with weak broad h alpha emission lines. **The Astrophysical Journal**, v. 249, p. 462–470, 1981. 3

OSTERBROCK, D. E.; FERLAND, G. J. **Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei**. [S.l.]: University science books, 2006. 5, 6, 10

OSTERBROCK, D. E.; KOSKI, A. Ngc 4151 and markarian 6—two intermediate-type seyfert galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 176, n. 1, p. 61P–66P, 1976. 27

PELAT, D.; ALLOIN, D.; FOSBURY, R. A. High resolution line profiles in the seyfert galaxy ngc 3783: the structure of the emitting regions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 195, n. 4, p. 787–804, 1981. 12

PENSTON, M.; PÉREZ, E. An evolutionary link between seyfert i and ii galaxies? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 211, n. 1, p. 33P–39P, 1984. 11

PETERSON, B. M. **An introduction to active galactic nuclei**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1997. 4, 9

PHILLIPS, M.; OSTERBROCK, D. The optical emission-line spectrum of 3c 120. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, IOP Publishing, v. 87, n. 520, p. 949, 1975. 11

PIER, E. A.; KROLIK, J. H. Infrared spectra of obscuring dust tori around active galactic nuclei. i-calculational method and basic trends. **The Astrophysical Journal**, v. 401, p. 99–109, 1992. 7

PIER, E. A.; VOIT, G. M. Photoevaporation of dusty clouds near active galactic nuclei. **The Astrophysical Journal**, v. 450, p. 628, 1995. 11

POGGE, R.; OWEN, J. Liner; an interactive spectral line analysis program. **OSU Int**, 1993. 36

POGGE, R. W. A extended ionizing radiation cone from the nucleus of the seyfert 2 galaxy ngc 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 328, p. 519–522, 1988. 10, 21, 25

PRIETO, M.; MEZCUA, M.; FERNÁNDEZ-ONTIVEROS, J.; SCHARTMANN, M. The central parsecs of active galactic nuclei: challenges to the torus. **Monthly**

Notices of the Royal Astronomical Society, Oxford University Press, v. 442, n. 3, p. 2145–2164, 2014. [59](#)

PRIETO, M. A.; MARCO, O.; GALLIMORE, J. Morphology of the coronal-line region in active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 364, n. 1, p. L28–L32, 2005. [13](#)

PROGA, D. Theory of winds in agns. **arXiv preprint astro-ph/0701100**, 2007. [75](#)

RICCI, C.; TRAKHTENBROT, B.; KOSS, M. J.; UEDA, Y.; SCHAWINSKI, K.; OH, K.; LAMPERTI, I.; MUSHOTZKY, R.; TREISTER, E.; HO, L. C. et al. The close environments of accreting massive black holes are shaped by radiative feedback. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 549, n. 7673, p. 488, 2017. [7](#)

RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T. Feeding and feedback in the active nucleus of mrk 1157 probed with the gemini near-infrared integral-field spectrograph. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 417, n. 4, p. 2752–2769, 2011. [14](#)

RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; WINGE, C.; BARBOSA, F. K. Gemini near-infrared integral field spectroscopy of the narrow-line region of eso 428- g14: kinematics, excitation and the role of the radio jet. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 373, n. 1, p. 2–12, 2006. [67](#), [72](#)

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 ngc 4051 using gemini nifs. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 385, n. 3, p. 1129–1142, 2008. [13](#)

ROBERTIS, M. D.; SHAW, R. A. Line profiles and the kinematics of the narrow-line region in seyfert galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 348, p. 421–433, 1990. [10](#)

RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; PRIETO, M.; MAZZALAY, X.; FERNÁNDEZ-ONTIVEROS, J.; LUQUE, R.; MÜLLER-SÁNCHEZ, F. Powerful outflows in the central parsecs of the low-luminosity active galactic nucleus ngc 1386. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 470, n. 3, p. 2845–2860, 2017. [21](#), [23](#), [61](#), [62](#), [65](#), [80](#)

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. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 653, n. 2, p. 1098, 2006. 11, 15, 61

RODRIGUEZ-ARDILA, A.; VIEGAS, S. M.; PASTORIZA, M. G.; PRATO, L. Near-infrared coronal lines in narrow-line seyfert 1 galaxies. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 579, n. 1, p. 214, 2002. 11, 15

SÁNCHEZ, F. M.; DAVIES, R.; EISENHAUER, F.; TACCONI, L.; GENZEL, R.; STERNBERG, A. Sinfoni adaptive optics integral field spectroscopy of the circinus galaxy. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 454, n. 2, p. 481–492, 2006. 13

SANDAGE, A.; VISVANATHAN, N. The color-absolute magnitude relation for e and s0 galaxies. ii-new colors, magnitudes, and types for 405 galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 223, p. 707–729, 1978. 28

SCHMIDT, M. Models of quasi-stellar sources. In: **Quasars and high-energy astronomy, Proceedings of the 2nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, held in Austin, December 15-19, 1964** Edited by KN Douglas, I. Robinson, A. Schild, EL Schucking, JA Wheeler, and NJ Woolf. New York: Gordon & Breach, 1969, p. 55. [S.l.: s.n.], 1969. p. 55. 2

SCHMITT, H. R.; DONLEY, J. L.; ANTONUCCI, R.; HUTCHINGS, J.; KINNEY, A. A hubble space telescope survey of extended [o iii] λ 5007 emission in a far-infrared selected sample of seyfert galaxies: observations. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, IOP Publishing, v. 148, n. 2, p. 327, 2003. 46, 61

SEYFERT, C. K. Nuclear emission in spiral nebulae. **The Astrophysical Journal**, v. 97, p. 28, 1943. 11

SLIPHER, V. M. The spectrum and velocity of the nebula ngc 1068 (m 77). **Lowell Observatory Bulletin**, v. 3, p. 59–62, 1917. 25

STALEVSKI, M.; FRITZ, J.; BAES, M.; NAKOS, T.; POPOVIĆ, L. Č. 3d radiative transfer modelling of the dusty tori around active galactic nuclei as a clumpy two-phase medium. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 420, n. 4, p. 2756–2772, 2012. 8

STORCHI-BERGMANN, T.; DELGADO, R. M. G.; SCHMITT, H. R.; FERNANDES, R. C.; HECKMAN, T. Circumnuclear stellar population, morphology, and environment of seyfert 2 galaxies: An evolutionary scenario. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 559, n. 1, p. 147, 2001. [24](#)

STORCHI-BERGMANN, T.; ERACLEOUS, M.; RUIZ, M. T.; LIVIO, M.; WILSON, A. S.; FILIPPENKO, A. V. Evidence for a precessing accretion disk in the nucleus of ngc 1097. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 489, n. 1, p. 87, 1997. [5](#)

STORCHI-BERGMANN, T.; LOPES, R. S.; MCGREGOR, P. J.; RIFFEL, R. A.; BECK, T.; MARTINI, P. Feeding versus feedback in ngc 4151 probed with gemini nifs-ii. kinematics. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 402, n. 2, p. 819–835, 2010. [13](#), [22](#), [28](#), [58](#)

STORCHI-BERGMANN, T.; MCGREGOR, P. J.; RIFFEL, R. A.; LOPES, R. S.; BECK, T.; DOPITA, M. Feeding versus feedback in ngc 4151 probed with gemini nifs-i. excitation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 394, n. 3, p. 1148–1166, 2009. [13](#), [22](#), [28](#), [53](#), [54](#), [55](#), [56](#)

STORCHI-BERGMANN, T.; RIFFEL, R. A.; RIFFEL, R.; DINIZ, M. R.; VALE, T. B.; MCGREGOR, P. J. Two-dimensional mapping of young stars in the inner 180 pc of ngc 1068: correlation with molecular gas ring and stellar kinematics. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 755, n. 2, p. 87, 2012. [22](#), [24](#)

STORCHI-BERGMANN, T.; SCHMITT, H. R.; CALZETTI, D.; KINNEY, A. L. Chemical abundance calibrations for the narrow-line region of active galaxies. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 115, n. 3, p. 909, 1998. [76](#)

STURM, E.; LUTZ, D.; VERMA, A.; NETZER, H.; STERNBERG, A.; MOORWOOD, A.; OLIVA, E.; GENZEL, R. Mid-infrared line diagnostics of active galaxies-a spectroscopic agn survey with iso-sws. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 393, n. 3, p. 821–841, 2002. [11](#)

THOMPSON, R. I.; CHARY, R.-R.; CORBIN, M. R.; EPPS, H. The location of the nucleus and the morphology of emission-line regions in ngc 1068. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 558, n. 2, p. L97, 2001. [13](#)

ULVESTAD, J. S.; WILSON, A. S. Radio structures of seyfert galaxies. vii-extension of a distance-limited sample. **The Astrophysical Journal**, v. 343, p. 659–671, 1989. [30](#), [67](#)

UNGER, S.; LEWIS, J.; PEDLAR, A.; AXON, D. Taurus observations of the [o iii] cone in ngc 1068. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 258, n. 2, p. 371–376, 1992. 25

URRY, C. M.; PADOVANI, P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, IOP Publishing, v. 107, n. 715, p. 803, 1995. 8

VIEGAS-ALDROVANDI, S.; CONTINI, M. Composite models for the narrow emission-line region of active galactic nuclei. vi-the fe lines. **Astronomy and Astrophysics**, v. 215, p. 253–261, 1989. 15

WANDERS, I.; GOAD, M. R.; KORISTA, K. T.; PETERSON, B. M.; HORNE, K.; FERLAND, G. J.; KORATKAR, A. P.; POGGE, R. W.; SHIELDS, J. C. The geometry and kinematics of the broad-line region in ngc 5548 from hst and iue observations. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 453, n. 2, p. L87, 1995. 9

WARD, M.; MORRIS, S. The reddening and high-excitation emission lines in ngc 3783. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 207, n. 4, p. 867–881, 1984. 11

WILSON, A.; ELVIS, M.; LAWRENCE, A.; BLAND-HAWTHORN, J. An x-ray image of the seyfert galaxy ngc 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 391, p. L75–L79, 1992. 10

WILSON, A.; PENSTON, M. Ic 4329a-the nearest quasar. **The Astrophysical Journal**, v. 232, p. 389–399, 1979. 12

WILSON, A.; ULVESTAD, J. Radio jets and high velocity gas in the seyfert galaxy ngc 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 275, p. 8–14, 1983. 24, 25

WINGE, C.; AXON, D. J.; MACCHETTO, F.; CAPETTI, A. The narrow-line region of ngc 4151: A turbulent cauldron. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 487, n. 2, p. L121, 1997. 28, 75

WINGE, C.; AXON, D. J.; MACCHETTO, F. D.; CAPETTI, A.; MARCONI, A. Hubble space telescope faint object camera spectroscopy of the narrow-line region of ngc 4151. i. gas kinematics. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 519, n. 1, p. 134, 1999. 75

WOO, J.-H.; URRY, C. M. Active galactic nucleus black hole masses and bolometric luminosities. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 579, n. 2, p. 530, 2002. 2

APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES DURANTE O PERÍODO DE MESTRADO

A.1 Artigo como co-autor

Powerful mechanical-driven outflows in the central parsecs of the Low Luminosity Active Galactic Nucleus ESO 428-G14. (D. May, A. Rodríguez-Ardila, M.A. Prieto, J.A. Ontiveiros, Y. Diaz, X. Mazzalay, em preparação)

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.