

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Kelly Frank Heckler

**ANÁLISE DA ORIGEM DA EMISSÃO E CINEMÁTICA DO GÁS NA
REGIÃO CENTRAL DA GALÁXIA NGC 4546**

Santa Maria, RS
2020

Kelly Frank Heckler

**ANÁLISE DA ORIGEM DA EMISSÃO E CINEMÁTICA DO GÁS NA REGIÃO
CENTRAL DA GALÁXIA NGC 4546**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Astronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Física**. Defesa realizada por videoconferência.

ORIENTADOR: Prof. Rogemar André Riffel

COORIENTADOR: Prof. Tiago Vecchi Ricci

Santa Maria, RS
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Heckler, Kelly Frank

Análise da origem da emissão e cinemática do gás na região central da galáxia NGC 4546 / Kelly Frank

Heckler.- 2020.

59 p.; 30 cm

Orientador: Rogemar André Riffel

Coorientador: Tiago Vecchi Ricci

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, RS, 2020

1. Galáxias ativas 2. Feedback 3. Cinemática e dinâmica de galáxias 4. Espectroscopia de campo integral
I. Riffel, Rogemar André II. Ricci, Tiago Vecchi III.
Titulo.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Kelly Frank Heckler. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

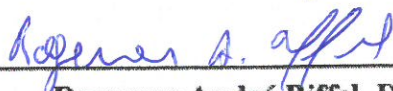
End. Eletr.: ke.heckler95@gmail.com

Kelly Frank Heckler

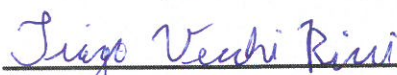
**ANÁLISE DA ORIGEM DA EMISSÃO E CINEMÁTICA DO GÁS NA REGIÃO
CENTRAL DA GALÁXIA NGC 4546**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Astronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Física.

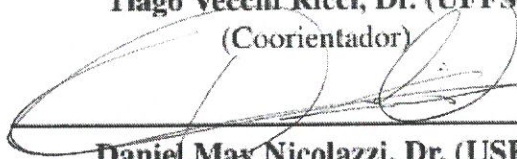
Aprovado em 11 de março de 2020:



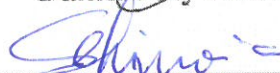
Rogemar André Riffel, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Tiago Vecchi Ricci, Dr. (UFFS)
(Coorientador)



Daniel May Nicolazzi, Dr. (USP)



Jáderson da Silva Schimoia, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

- ★ *Ao meu filho Kauã, que é a razão de toda a minha força e determinação para lutar pelos meus objetivos;*
- ★ *A minha família, por todo o apoio e incentivo que recebi para nunca desistir, e vencer mais esta etapa;*
- ★ *Ao Prof. Rogemar, pela orientação e pela oportunidade de realizar este trabalho;*
- ★ *Ao Prof. Tiago pela coorientação, e que desde a minha graduação está sempre a disposição para conversar e ajudar no que fosse necessário;*
- ★ *À Vanessa e Alice que foram (e são!) muito importantes para mim nestes dois últimos anos. Eu não sei o que seria de mim sem vocês!*
- ★ *À Alice, Vanessa, Gabriele e Roberta H., por todos os momentos e conversas incríveis que tivemos;*
- ★ *A todos os colegas do Laboratório de Astrofísica;*
- ★ *À CAPES, pelo financiamento da pesquisa - Código de Financiamento 001.*

RESUMO

ANÁLISE DA ORIGEM DA EMISSÃO E CINEMÁTICA DO GÁS NA REGIÃO CENTRAL DA GALÁXIA NGC 4546

AUTORA: Kelly Frank Heckler

ORIENTADOR: Rogemar André Riffel

COORIENTADOR: Tiago Vecchi Ricci

Acredita-se que a maioria das galáxias esferoidais hospedam um Buraco Negro Supermassivo (SMBH) em seu centro e que, em algum momento da sua vida, tenha se tornado ativo, originando um Núcleo Ativo de Galáxia (AGN). A formação e evolução da galáxia pode estar diretamente ligada ao crescimento do SMBH e ao *feedback* do AGN. Neste contexto, estudos detalhados sobre a cinemática e distribuição do gás ionizado na região central do AGN são fundamentais para investigar os processos de *feeding* e *feedback* e seu impacto sobre a evolução das galáxias. Neste trabalho, apresentamos uma análise detalhada sobre a cinemática do gás ionizado e das estrelas da região interna a 170 pc da galáxia ativa NGC 4546. O objetivo geral deste trabalho é detectar e caracterizar movimentos não-circulares associados a *outflows* de gás ionizado a partir do AGN. As observações foram realizadas com o *Gemini Multi-Object Spectrograph* (GMOS) no modo de unidade de campo integral (IFU), com cobertura espectral de 4736-6806 Å, cobrindo as linhas de emissão mais intensas observadas em espectros de AGNs. A cinemática estelar foi medida através do ajuste das linhas de absorção utilizando o método *penalized Pixel Fitting* (PPXF) usando como *template* a biblioteca estelar MILES. A distribuição de fluxos de linhas de emissão e cinemática do gás foram medidas a partir do ajustes dos perfis das linhas de emissão do cubo de dados após a subtração da componente estelar, utilizando a rotina PROFIT (line-PROFILE FITting). Encontramos que a cinemática estelar e do gás ionizado é dominada por uma componente de disco em rotação e que ambas as estruturas estão girando em sentidos contrários. A cinemática do gás também revela movimentos não-circulares, interpretados como originados por um *outflow* em formato bicônico devido ao AGN de NGC 4546. Estimamos um valor de $\sim 0,068 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ para a taxa de *outflow* de gás ionizado e uma potência cinética (\dot{E}_{cin}) do *outflow* equivalente a $1,12 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, que corresponde a somente 0,013 % da luminosidade bolométrica do AGN. Portanto, verificamos que a \dot{E}_{cin} do *outflow* não é suficiente para influenciar a formação estelar da galáxia em grande escala. Este tipo de *feedback* de AGN é chamado de *modo de manutenção*, no qual os *outflows* não possuem velocidade suficiente para escapar dos limites da galáxia, porém podem ser eficientes em redistribuir o gás em sua região central.

Palavras-chave: Galáxias ativas. *Feedback*. Cinemática e dinâmica de galáxias. Espectroscopia de campo integral.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE ORIGIN OF THE GAS EMISSION AND KINEMATICS IN THE CENTRAL REGION OF THE GALAXY NGC 4546

AUTHOR: Kelly Frank Heckler
ADVISOR: Rogemar André Riffel
CO-ADVISOR: Tiago Vecchi Ricci

It is believed that most spheroidal galaxies host a Supermassive Black Hole (SMBH) at their centers and that, at some point, it becomes active, originating an Active Galaxy Nuclei (AGN). The formation and evolution of the galaxy may be directly linked to the growth of SMBH and AGN feedback. In this context, detailed studies on the kinematics and distribution of ionized gas in the central region of the AGN are fundamental to investigate the processes of Feeding and Feedback and their impact on the evolution of galaxies. In this work, we present a detailed analysis of the kinematics of the ionized gas and stars from the inner region at 170 pc of the active galaxy NGC 4546. The main goal of this work is to detect and characterize non-circular motions associated with ionized gas outflows from the AGN. The observations were made with the Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) in integral field unit (IFU) mode, with a spectral coverage of 4736–6806 Å, covering the strongest emission lines observed in AGN spectra. The stellar kinematics was measured by fitting the absorption lines using the penalized Pixel Fitting method (PPXF) using the MILES stellar library as template. The distribution of emission line fluxes and kinematics were measured by fitting the emission-line profiles of the data cube after subtracting the stellar component, using the profit (line-profile fitting) routine. We find that stellar and ionized gas kinematics are dominated by a rotating disk component and that both structures are rotating in opposite directions. The gas kinematics also reveals non-circular motions, interpreted as originating from a biconic outflow produced by the central AGN of NGC 4546. We estimate a value of $\sim 0.068 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ for the ionized gas outflow rate and a kinetic power (\dot{E}_{cin}) of the outflow equivalent to $1.12 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, which corresponds to only 0.013 % of the AGN bolometric luminosity. Therefore, we find that the \dot{E}_{cin} of the outflow is not high enough to affect the star formation of the galaxy in large scale. This type of AGN Feedback is called as maintenance mode, in which the velocity of the outflows is not high enough to escape the galaxy boundaries, but they can still be efficient in redistributing the gas in its central region.

Keywords: Active Galaxies. Feedback. Galaxy kinematics and dynamics. Integral Field Spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação esquemática da Classificação Morfológica de Hubble	13
Figura 1.2 – Exemplos dos diferentes tipos de galáxias.	14
Figura 1.3 – Exemplos de galáxias hospedeiras de AGNs no óptico.	16
Figura 1.4 – Representação do modelo unificado para AGNs.	18
Figura 1.5 – Exemplo de Diagrama BPT	20
Figura 1.6 – Diagrama WHAN.	21
Figura 2.1 – Representação do IFU do GMOS.	26
Figura 2.2 – Representação de um cubo de dados.	29
Figura 3.1 – Exemplos de ajustes dos espectros de NGC 4546.	33
Figura 3.2 – Exemplos de ajustes das linhas de emissão $H\beta$ λ 4861 e $[O\ III]$ $\lambda\lambda$ 4959,5007 em três posições da galáxia.	34
Figura 3.3 – Exemplos de ajustes das linhas de emissão $H\alpha$ λ 6563 e $[N\ II]$ $\lambda\lambda$ 6548,6563 em três posições da galáxia.	35
Figura 4.1 – Imagem da galáxia NGC 4546 em grande escala no ultravioleta obtida pelo telescópio GALEX, e retirado da base de dados NED.	38
Figura 4.2 – Mapa do contínuo estelar e mapas de fluxo das linhas de emissão da galáxia NGC 4546	39
Figura 4.3 – Mapa da largura equivalente de $H\alpha$ ($EW_{H\alpha}$) de NGC 4546, em \AA	40
Figura 4.4 – Mapas de razões das intensidades das linhas de NGC 4546.	40
Figura 4.5 – Diagramas de diagnóstico BPT e mapas de excitação.	42
Figura 4.6 – Diagrama de diagnóstico WHAN e mapa de excitação do gás para a galáxia NGC 4546.	43
Figura 4.7 – Mapas de velocidades de NGC 4546 em km s^{-1}	44
Figura 4.8 – Mapas de dispersão de velocidades de NGC 4546 em km s^{-1}	45
Figura 5.1 – Modelos de rotação para NGC 4546.	49
Figura 5.2 – Modelos de rotação para NGC 4546.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Parâmetros obtidos a partir do ajuste do modelo cinemático ao campo de velocidades das estrelas e dos gás de NGC 4546.	50
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGN	<i>Active Galactic Nuclei</i> ou Núcleo Ativo de Galáxias
BLR	<i>Broad Line Region</i> ou Região de linhas largas
BLRG	<i>Broad-Line Radio Galaxy</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i> ou Dispositivo de Carga Acoplada
FOV	<i>Field of View</i>
FWHM	<i>Full Width at a Half Maximum</i> ou Largura a meia altura
GALEX	<i>Galaxy Evolution Explorer</i>
GMOS	<i>Gemini Multi-Object Spectrographs</i>
HOLMES	<i>Hot evolved low-mass stars</i> ou estrelas quentes de baixa massa evoluídas
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IFS	<i>Integral Field Spectroscopy</i> ou Espectroscopia de Campo Integral
IFU	<i>Integral Field Unit</i> ou Unidade de Campo Integral
IRAF	<i>Image Reduction and Analysis Facility</i>
LINER	<i>Low Ionization Nuclear Emission-Line Regions</i>
LLAGN	<i>Low Luminosity Active Galactic Nuclei</i> ou Núcleo ativo de galáxias de baixa luminosidade
LOSVD	<i>Line-of-sight velocity distribution</i> ou Distribuição de velocidade na linha de visada
MOS	<i>Multi-Object Spectroscopy</i>
NED	<i>NASA/IPAC Extragalactic Database</i>
NLR	<i>Narrow Line Region</i> ou Região de linhas estreitas
NLRG	<i>Narrow-Line Radio Galaxy</i>
PA	<i>Position angle</i> ou ângulo de posição
PG	<i>Passive Galaxies</i>
post-AGB	<i>Post Asymptotic Giant Branch stars</i> ou ramo pós assintótico das gigantes
PSF	<i>Point Spread Function</i>
Quasar	<i>Quasi-stellar radio sources</i>
RG	<i>Retired Galaxies</i>

SDSS	<i>Sloan Digital Sky Survey</i>
SF	<i>Star Forming</i>
SMBH	<i>Super Massive Black Hole</i> ou Buraco Negro Supermassivo
VLA	<i>Very Large Array</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Elipticidade
M_B	Magnitude absoluta
M_\bullet	Massa do Buraco Negro
M_\odot	Massa do Sol ($1,98 \times 10^{30}$ kg)
L_\odot	Luminosidade do Sol ($3,83 \times 10^{33}$ erg s ⁻¹)
ano-luz	Distância ($9,461 \times 10^{15}$ m)
parsec	1 pc = $3,086 \times 10^{16}$ m
arcsec	Segundos de arco
η_e	Densidade eletrônica
$EW_{H\alpha}$	Largura equivalente de H α
L_{edd}	Luminosidade de Eddington
R_{edd}	Razão de Eddington
L_{bol}	Luminosidade bolométrica
\dot{M}_{out}	Taxa da massa do <i>outflow</i>
\dot{E}_{cin}	Potência cinética do <i>outflow</i>
Å	Ângström (10^{-10} m)
Ψ_0	Orientação da linha dos nodos
v_{sis}	Velocidade sistêmica
σ	Dispersão de velocidades
c	Velocidade da luz (3×10^5 km s ⁻¹)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS	15
1.2	LINERS	18
1.3	DIAGRAMAS DE DIAGNÓSTICO BPT E WHAN.....	19
1.4	<i>FEEDBACK</i> DE AGN.....	21
1.5	A GALÁXIA NGC 4546.....	23
1.6	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	25
2	OS DADOS.....	26
2.1	O GMOS	26
2.2	OBSERVAÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS	27
2.3	TRATAMENTO DOS DADOS	29
3	ANÁLISE	31
3.1	SUBTRAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS POPULAÇÕES ESTELARES.....	31
3.2	AJUSTES DAS LINHAS DE EMISSÃO	33
3.3	MODELO DE ROTAÇÃO	35
4	RESULTADOS	37
4.1	MAPAS DE FLUXOS.....	37
4.2	RAZÕES DE FLUXOS DE LINHAS DE EMISSÃO E DIAGRAMAS DE DIAGNÓSTICO.....	40
4.3	CAMPOS DE VELOCIDADES E MAPAS DE DISPERSÃO DE VELOCIDADES ..	43
5	DISCUSSÕES	46
5.1	EXCITAÇÃO DO GÁS	47
5.2	CINEMÁTICA DO GÁS.....	48
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

O fascínio e a busca por conhecer e entender o que está no céu, além do nosso alcance, segue por gerações. Por muito tempo, as observações do céu só eram possíveis a olho nu. Com o tempo, foram surgindo ferramentas que possibilitam um estudo detalhado sobre o Universo.

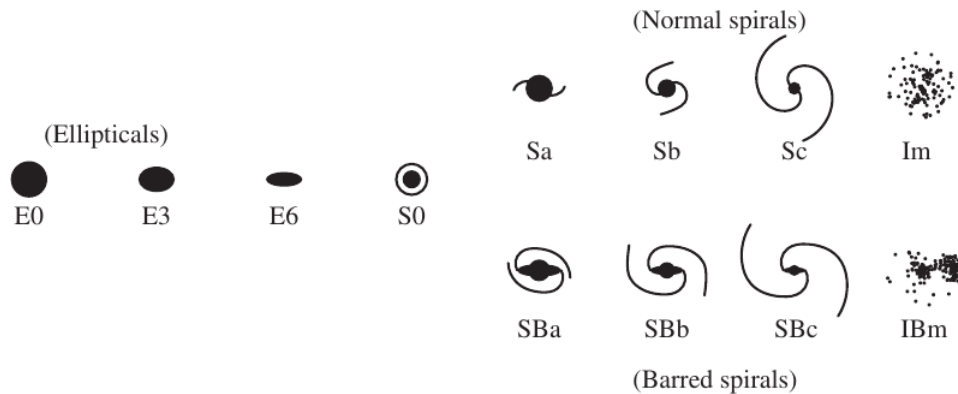
Por volta do século XVIII, astrônomos observaram pela primeira vez a existência de objetos difusos e extensos no céu, chamados de "nebulosas espirais". Em torno de 1755, Immanuel Kant (1724-1804), influenciado por Thomas Wright (1711-1786), propôs que estas "nebulosas" poderiam ser sistemas estelares com tamanhos comparáveis com a Via Láctea. Kant ainda sugeriu que, se a extensão da nossa galáxia fosse limitada, estas "nebulosas" poderiam ser objetos extremamente distantes, como se fossem ilhas no Universo. Em 1920, foi realizado um debate acerca da natureza destes objetos, norteado por duas ideias principais: Harlow Shapley (1885-1972) defendia que estes objetos eram pequenos e faziam parte da nossa galáxia, enquanto que Heber Doust Curtis (1872-1942) defendia a ideia de que estes objetos seriam sistemas independentes, com dimensões semelhantes à Via Láctea. Naquela época, a medida de distâncias ainda não era precisa e, dessa forma, o debate não chegou a nenhuma conclusão.

Somente após a publicação do importante trabalho de Henrietta S. Leavitt (1868-1921) em 1912, no qual ela encontra uma relação direta entre a luminosidade e o período de oscilação da variável Cefeida, conhecido como relação período-luminosidade, que foi possível estimar a distância de objetos extragalácticos. Então, em 1925, Edwin Hubble (1889-1953) estimou a distância da "nebulosa" de Andrômeda (M31) utilizando uma variável Cefeida, provando que as "nebulosas espirais" eram sistemas estelares independentes.

Galáxias são sistemas gravitacionalmente ligados compostos por matéria bariônica (estrelas, gás e poeira) e matéria escura. Devido aos diferentes tipos de galáxias existentes na natureza, foi criado um sistema de classificação (Fig. 1.1), conhecido como Sequência de Hubble ou Diapasão de Hubble (Hubble, 1936; Sandage, 1961), que levam em consideração a morfologia destes objetos, separando-os em dois grupos principais: elípticas (E) e espirais (S). As galáxias elípticas são divididas de acordo com a sua elipticidade¹, determinada pela razão entre o semi-eixo maior e menor: objetos do tipo E0 apresentam geometria circular e do tipo E7 são as mais achatadas. Já as galáxias espirais são divididas em dois grupos principais: com e sem barra. As galáxias espirais ainda se subdividem em três grupos (a, b e c) de acordo com a abertura dos braços espirais e o tamanho relativo entre o bojo e o disco. Galáxias lenticulares (S0) são objetos de transição entre as espirais e elípticas, apresentam um disco e bojo central, mas sem a presença de braços espirais. Uma classe de galáxias, não incluída originalmente na classificação de Hubble, não possui uma morfologia predominante e são chamadas de irregulares (Irr), sendo incluídas após a classe das espirais na classificação de Hubble. Uma revisão da sequência de Hubble proposta por de Vaucouleurs, de Vaucouleurs e Shapley (1964), resultou em uma classi-

¹ $\epsilon = 10(1 - b/a)$, onde a e b são os diâmetros do semi-eixo maior e menor da galáxia, respectivamente.

Figura 1.1 – Representação esquemática da Classificação Morfológica de Hubble



Fonte: Obtido de Mo, van den Bosch e White (2010).

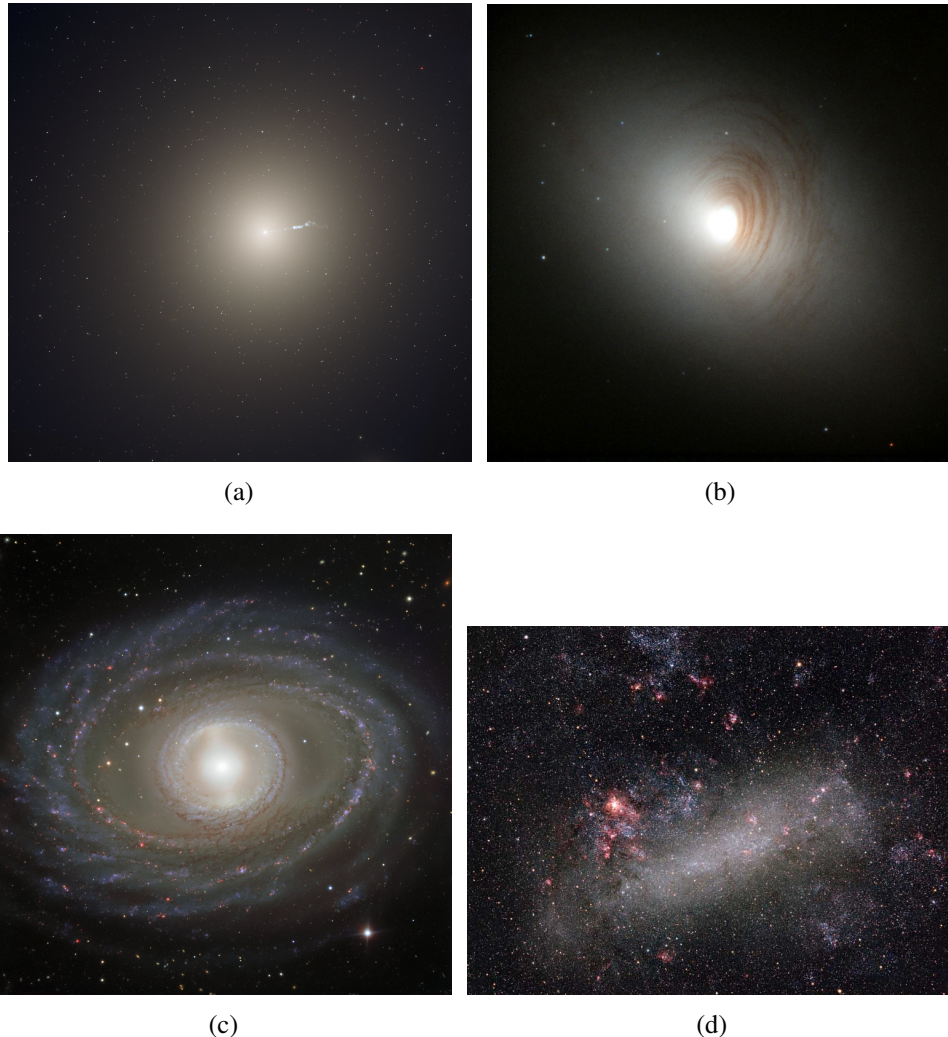
ficação mais detalhada, levando em consideração, por exemplo, a presença ou não de anéis e de braços espirais em galáxias irregulares. Hubble chamou as galáxias elípticas de *early-type* (tipo precoce) e as espirais de *late-type* (tipo tardio), pois acreditava que esta sequência reproduzia o processo de evolução das galáxias, o que não é verdade, mas até hoje continua-se utilizando esta nomenclatura.

As galáxias elípticas são caracterizadas pela sua distribuição superficial de brilho suave e pela estrutura esferoidal ou elíptica, como pode ser observado na Figura 1.2(a). São pobres em gás e poeira, e sua cor amarelada indica a presença de populações estelares velhas (da ordem de 10^{10} anos) e de gradientes de metalicidades (Carroll; Ostlie, 2007). Estas galáxias são parecidas com o bojo das espirais, onde a taxa de formação estelar é muito baixa ou já se encerrou há um certo tempo. Galáxias elípticas de luminosidades intermediárias (com magnitudes absolutas $-20,5 \lesssim M_B \lesssim -18,0$) e o bojo de galáxias de disco geralmente apresentam uma cinemática dominada por rotação (Schneider, 2006). Por outro lado, galáxias elípticas de alta luminosidade apresentam uma distribuição de velocidades estelar anisotrópica, ou seja, a cinemática é dominada pela dispersão de velocidades que possui direções preferenciais.

As galáxias lenticulares são chamadas, de acordo com a classificação de Hubble, de objetos de transição entre espirais e elípticas, pois apresentam uma estrutura semelhante às espirais (disco e bojo) mas é formada principalmente por populações estelares velhas e pouca matéria interestelar, assim como as galáxias elípticas. Na Figura 1.2(b), é possível observar que a galáxia lenticular NGC 2787 apresenta uma cor amarelada e a presença de um bojo, reunindo características das galáxias espirais e elípticas.

Galáxias espirais possuem uma estrutura de disco suportada rotacionalmente, formada por estrelas, gás e poeira, que se distribuem em forma de braços espirais ao longo de todo o disco, e uma componente esférica central chamada de bojo. Como é possível observar na Figura 1.2(c), galáxias espirais geralmente apresentam um disco azulado e um bojo amarelado. A região do disco é rica em gás que serve como combustível para a formação de novas estrelas,

Figura 1.2 – Exemplos dos diferentes tipos de galáxias. (a) Galáxia elíptica M87. (b) Galáxia lenticular barrada NGC 2787. (c) Galáxia espiral barrada NGC 1398. (d) Galáxia irregular anã NGC 1569.



Fonte: Imagens obtidas em <https://www.spacetelescope.org/> e <https://www.eso.org/>.

formando as estruturas que podem ser observadas na figura. A cor azulada é devido, principalmente, às estrelas jovens e massivas, ao gás ionizado e as Regiões HII. Já a cor amarelada do bojo está associada as populações estelares mais velhas, da ordem de 10^{10} anos, que possuem maiores gradientes de metalicidade, além da região ser pobre em gás, resultando em uma baixa taxa de formação estelar na componente esferoidal (Carroll; Ostlie, 2007). Galáxias com uma componente de disco, como as espirais e as lenticulares, podem apresentar uma estrutura linear no seu centro, chamadas de barras. Estas estruturas podem desempenhar um papel importante no transporte de matéria para a região central da galáxia (García-Burillo; Combes, 2012; Storchi-Bergmann; Schnorr-Müller, 2019).

Galáxias irregulares são caracterizadas pela ausência de uma simetria ou estrutura regular e, geralmente, são menos massivas que galáxias espirais ou elípticas. Galáxias como a Grande Nuvem de Magalhães, que pode ser visualizada na Figura 1.2(d), apresentam regiões

de formação estelar recente e são formadas tanto por populações estelares jovens quanto velhas e, além disso, dispõem de um grande reservatório de gás e poeira.

1.1 NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS

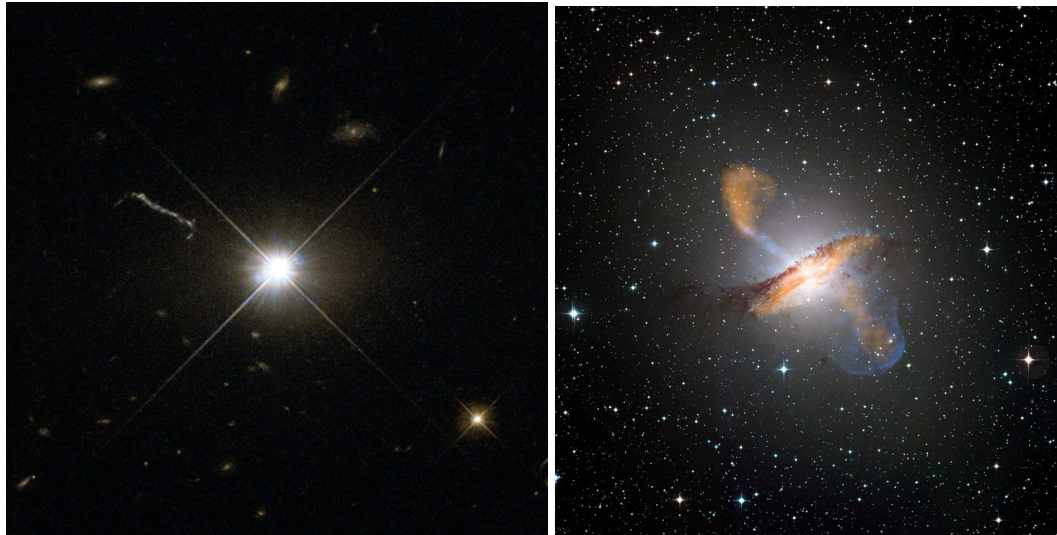
Espectros de galáxias são geralmente dominados pelo contínuo estelar com pequenas contribuições do gás e poeira, emitindo a maior parte da sua radiação na faixa do óptico e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (Schneider, 2006). Porém, alguns objetos possuem espectros caracterizados por uma emissão contínua bastante intensa, principalmente na banda do UV mas que se estende desde o rádio até raios-x, assim como linhas de emissão largas e proeminentes. Tal emissão tem origem em uma fonte compacta no centro da galáxia e não pode ser explicada somente pela componente estelar, algum outro processo energético deve estar associado.

Estudos indicam que todas as galáxias com componentes esferoidais (galáxias elípticas e bojo de galáxias espirais) devem possuir um buraco negro supermassivo (*Super Massive Black Hole* - SMBH) no seu centro (Magorrian et al., 1998), com massa que varia entre $10^6 \leq M_{\bullet} \leq 10^9$ massas solares M_{\odot} (Ferrarese; Merritt, 2000). A maior parte dos buracos negros supermassivos estão "inativos" e são detectados de forma indireta, isto é, através dos seus efeitos gravitacionais sobre os objetos mais próximos (estrelas ou gás). Já os buracos negros "ativos" podem ser também identificados através da distribuição de energia e luminosidade do disco de acreção e seus efeitos no gás que o circunda. Galáxias cujos buracos negros estão acretando matéria são chamadas de galáxias ativas, as quais possuem um espectro consideravelmente diferente do espectro de galáxias normais – aquelas em que os buracos negros estão quiescentes.

A atividade do SMBH provoca a emissão de radiação, observada ao longo de todo o espectro eletromagnético. Esse processo recebe o nome de Núcleo Ativo de Galáxias (AGNs – *Active Galactic Nuclei*), no qual a matéria cai em direção ao SMBH transformando energia potencial gravitacional em energia cinética, térmica e luminosa. A quantidade de energia liberada nos tipos mais luminosos de AGNs (como os quasares) faz com que a região central de galáxias ativas seja muito brilhante, de tal forma que a luminosidade da região compacta central seja equivalente ou maior que a luminosidade total da galáxia. De acordo com Pradhan e Nahar (2011), a luminosidade de um AGN varia de 10^{12} a $10^{15} L_{\odot}$, enquanto que a luminosidade de uma galáxia normal é da ordem de $10^{11} L_{\odot}$. Sendo assim, a origem de toda a luminosidade observada em galáxias ativas não pode ser atribuída somente às estrelas, uma parte se deve à atividade do buraco negro central.

Os AGNs são classificados de acordo com suas propriedades espectrais e sua luminosidade. É levado em consideração, por exemplo, a presença de linhas de emissão largas e estreitas e a luminosidade da fonte central. Galáxias que possuem linhas de emissão largas e estreitas são chamadas de tipo 1, enquanto que as que possuem somente linhas estreitas são chamadas

Figura 1.3 – Exemplos de galáxias hospedeiras de AGNs no óptico. (a) Quasar 3C 273. (b) Rádio galáxia Centaurus A (Imagem composta a partir de três diferentes faixas de comprimento de onda: na cor azul o raio X, o laranja indica o comprimento de onda de $870 \mu\text{m}$ e as outras cores são do óptico). (c) Galáxia Seyfert NGC 4151. (d) Galáxia LINER M 104 (Galáxia Sombrero).



(a)

(b)



(c)

(d)

Fonte: Imagens obtidas em <https://www.spacetelescope.org/> e <https://www.eso.org/>.

de tipo 2. Os principais tipos de AGNs são: quasares, rádio galáxias, galáxias Seyfert e LINERs. Os quasares (*quasi-stellar radio sources*) são AGNs de alta luminosidade e altas taxas de acreção com intensas linhas de emissão largas, que chegam a ser mil vezes mais brilhantes que uma galáxia normal. Eles estão entre os objetos mais brilhantes do Universo. Rádio galáxias também estão relacionadas a AGNs e são caracterizadas por intensas emissões em rádio e subdivididas de acordo com a presença de linhas de emissão largas (*Broad-Line Radio Galaxies* - BLRGs) e estreitas (*Narrow-Line Radio Galaxies* - NLRGs). As BLRGs apresentam ambas linhas largas (com larguras a meia altura (FWHM) maiores do que 1000 km s^{-1}) e estreitas (FWHM $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$), enquanto que as NLRGs apresentam somente linhas de emissão estreitas.

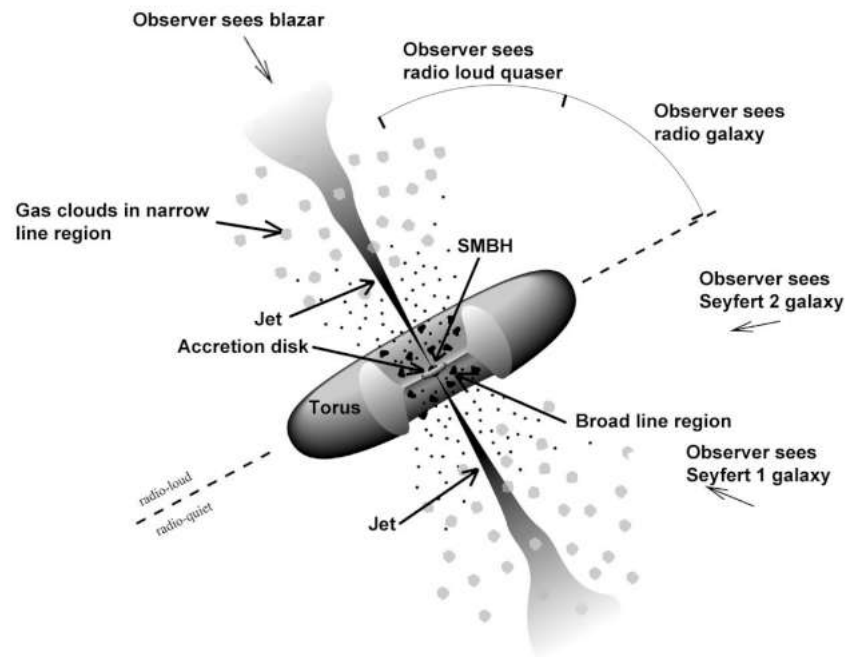
tas. Da mesma forma que os quasares e as rádio galáxias, as galáxias Seyfert e os LINERs (*Low Ionization Nuclear Emission-line Regions*) também são divididas em tipo 1 e tipo 2, de acordo com a presença de linhas de emissão largas e estreitas. Ainda, Seyferts e LINERs são considerados AGNs de baixa luminosidade (*Low Luminosity Active Galactic Nuclei - LLAGN*), mas se diferem quanto as características das linhas de emissão. Galáxias Seyferts são caracterizadas pela presença de intensas linhas de emissão de elementos de alta ionização (como [OIII], entre outros). Enquanto que os LINERs apresentam intensas linhas de emissão de elementos de baixa ionização, como [O I] $\lambda 6300$ e [N II] $\lambda \lambda 6548, 6583$. A Figura 1.3 apresenta imagens no óptico de galáxias hospedeiras de AGNs para cada um dos exemplos acima citados.

Na busca por explicar a origem das emissões de linhas largas e estreitas em galáxias hospedeiras de AGN, separadas em tipo 1 e 2, o modelo unificado (Antonucci; Miller, 1985; Antonucci, 1993; Urry; Padovani, 1995) propõe que todos os AGNs são formados por uma mesma estrutura. Dessa forma, a presença de linhas largas e estreitas pode ser explicada através do ângulo de inclinação desta estrutura em relação à linha de visada. A Figura 1.4 apresenta uma representação esquemática do modelo unificado para AGNs. O modelo unificado propõe que o disco de acreção é envolto por um toroide de gás e poeira. Entre o toroide e as extremidades do disco de acreção, existe uma região conhecida como *Broad Line Region* (BLR), na qual ocorre a formação de linhas de emissão largas, e na região externa ao toroide, existe a região de formação de linhas estreitas, conhecida como *Narrow Line Region* (NLR). O toroide de poeira é o principal responsável pelo obscurecimento da região central do AGN. Se o toroide é visto *edge-on*, exatamente como está representado na Figura 1.4, a região central, onde se encontra o buraco negro e a região de formação de linhas largas, é totalmente obscurecida por ele. Se a inclinação da estrutura com relação à linha de visada muda, a BLR se torna visível, possibilitando o aparecimento das componentes largas nos espectros dos objetos.

A BLR é formada por nuvens de gás distribuídas em uma região espacialmente não-resolvida, com tamanho ≤ 1 ano-luz (aproximadamente 0.3 parsecs). Essa região apresenta densidade eletrônica η_e da ordem de 10^9 cm^{-3} , o que faz com que apenas linhas de emissão permitidas sejam observadas, com largura a meia altura (*Full Width at Half Maximum - FWHM*) de aproximadamente 2.000 a 25.000 km s^{-1} (Osterbrock; Ferland, 2006). A formação de linhas proibidas não ocorre em regiões de alta densidade devido as constantes colisões entre os íons e elétrons, de tal forma que não há tempo suficiente para que algum elemento possa fazer a transição entre os níveis espontaneamente.

Na NLR são formadas tanto linhas permitidas como proibidas, com FWHM da ordem de 400 a 1.000 km s^{-1} e densidade semelhante às observadas em regiões HII, com η_e da ordem de 10^3 cm^{-3} (Pradhan; Nahar, 2011). A NLR é espacialmente resolvida pelos telescópios atuais e sua extensão pode variar entre 10 pc a 1 kpc (Pogge et al., 2000). A distribuição de gás na NLR não é homogênea, mas sim, distribuída em forma de nuvens irregulares e distorcidas (Mo; van den Bosch; White, 2010) observadas ao longo de um bicone, chamado de bicone de ionização. A radiação ionizante proveniente do disco de acreção é colimada pelo toro molecular, fazendo

Figura 1.4 – Representação do modelo unificado para AGNs.



Fonte: <https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/agn/>

com que o feixe de radiação seja emitido na forma de um cone (Pogge et al., 2000; Schmitt; Storchi-Bergmann; Baldwin, 1994), com ângulos de abertura variando entre 30° e 100° (Fischer et al., 2014), como mostra na Figura 1.4.

Acredita-se que a radiação não-térmica, produzida pelo disco de acreção, possa ser a principal responsável por fotoionizar o gás da BLR e NLR em galáxias Seyferts e LINERs. Porém, em LINERs outros fenômenos também podem ser responsáveis pela ionização da NLR, como choques ou estrelas post-AGBs. A seguir focamos nossa discussão nos LINERs, objeto de estudo do presente trabalho.

1.2 LINERS

Os LINERs fazem parte da classe dos LLAGNs e seu espectro é caracterizado pela presença de estreitas e intensas linhas de emissão de elementos de baixa ionização como [O I] $\lambda 6300$ e [N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$, com larguras similares as regiões de linhas estreitas de galáxias Seyferts, mas com luminosidades muito menores. De acordo com um estudo realizado com dados do Palomar Survey (Ho; Filippenko; Sargent, 1997; Ho, 2008), LINERs são o tipo mais comum de AGN encontrado em galáxias próximas. Eles correspondem a cerca de 2/3 da população de AGNs do Universo local (considerando todos os objetos classificados como LINERs, Seyferts e objetos de transição).

A classe dos LINERs foi originalmente definida por Heckman (1980) a partir de razões

de intensidade envolvendo linhas de emissão do oxigênio ($[\text{O II}] \lambda 3727 / [\text{O III}] \lambda 5007 \geq 1$ e $[\text{O I}] \lambda 6300 / [\text{O III}] \lambda 5007 \geq 1/3$). Atualmente, para distinguir os objetos de emissão Seyfert e LINER, utiliza-se a razão de intensidades de linhas de emissão no óptico em diagramas do tipo BPT, propostos por Baldwin, Phillips e Terlevich (1981) e Veilleux e Osterbrock (1987). Estes diagramas de diagnóstico separam objetos de acordo com seu mecanismo de excitação em: AGNs (Seyferts e LINERS), Regiões H II e objetos de transição.

Assim como os demais AGNs, os LINERS do tipo 1 também podem apresentar uma componente larga na linha de $\text{H}\alpha$, como consequência direta da ionização do gás na BLR, no qual o seu espectro é semelhante a emissão Seyfert de baixa luminosidade. Neste caso, não resta dúvida sobre a fonte de ionização do objeto. Porém, além de AGNs como mecanismo de ionização para LINERS (Ferland; Netzer, 1983; Halpern; Steiner, 1983), esta classe de objetos pode estar também relacionada a ondas de choque (Heckman, 1980) ou ionização por populações de estrelas do tipo *post-asymptotic giant branch* (post-AGB) (Binette et al., 1994; Stasińska et al., 2008). Dessa forma, sem a presença da componente larga de $\text{H}\alpha$ torna-se mais difícil identificar o mecanismo responsável pela ionização do gás. Nestes casos, uma alternativa é a utilização do diagrama WHAN para classificar o objeto, levando em consideração que o diagrama torna possível a separação entre o que é AGN e o que é *fake-AGN* de forma mais eficaz que os demais diagramas. Identificar o mecanismo responsável pela ionização do gás de objetos com emissão LINER, quando a componente larga não é observada, ainda é um desafio e segue em discussão.

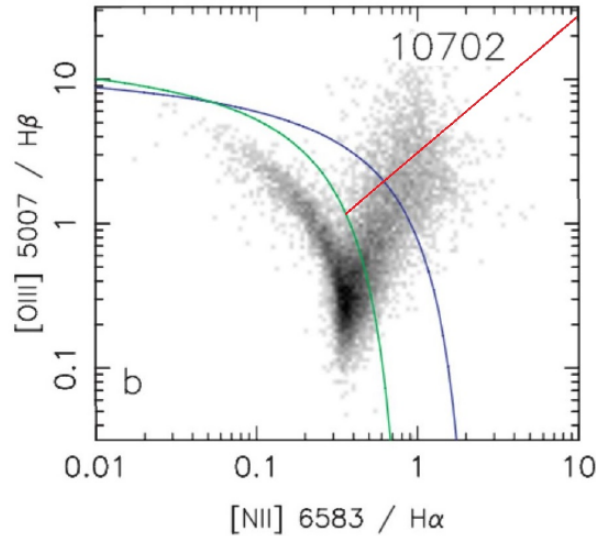
1.3 DIAGRAMAS DE DIAGNÓSTICO BPT E WHAN

Na busca por classificar os diferentes tipos de objetos extragalácticos, foram criados sistemas de classificação baseados na intensidade das linhas de emissão no óptico, dado que o mecanismo de excitação dos diferentes tipos de objetos é conhecida. Os mecanismos de excitação predominantes são: (a) fotoionização por estrelas do tipo O ou B, que ocorrem nas regiões de formação estelar; (b) fotoionização pelo contínuo em forma de lei de potência, originado no AGN; (c) aquecimento por ondas de choque e (d) fotoionização por nebulosas planetárias.

O diagrama BPT, que recebe esse nome em referência aos seus criadores Baldwin, Phillips e Terlevich (1981), tem como objetivo classificar objetos extragalácticos em função do tipo de mecanismo de excitação do gás, utilizando a razão das intensidades das linhas de emissão: $[\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta$, $[\text{N II}] \lambda 6583 / \text{H}\alpha$, $[\text{S II}] \lambda \lambda 6716, 6731 / \text{H}\alpha$ e $[\text{O I}] \lambda 6300 / \text{H}\alpha$. Este diagrama separa os objetos entre *Star forming* (SF), AGN (Seyferts e LINERS) e uma região de transição entre SF e AGN.

A separação entre objetos SF e AGN é dada pela linha teórica proposta por Kewley et al. (2001), para as razões de linhas $[\text{N II}] \lambda 6583 / \text{H}\alpha$, $[\text{S II}] \lambda \lambda 6716, 6731 / \text{H}\alpha$ e $[\text{O I}] \lambda 6300 / \text{H}\alpha$ versus $[\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta$. Essa linha teórica surge de um estudo realizado a partir da combinação de síntese de populações estelares e da modelagem de fotoionização devido à ionização

Figura 1.5 – Exemplo de Diagrama BPT para as razões de linha $[N II] \lambda 6583/H\alpha$ versus $[O III] \lambda 5007/H\beta$. A linha teórica proposta por Kewley et al. (2001) está representada em azul, a linha teórica proposta por Kauffmann et al. (2003) está representada em verde e a linha proposta por Cid Fernandes et al. (2010) está representada em vermelho.



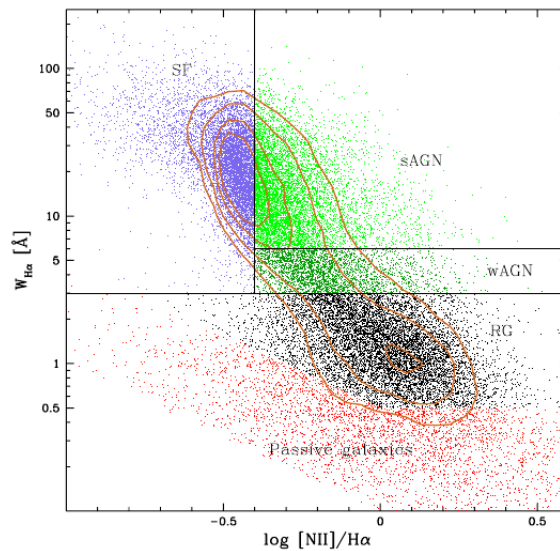
Fonte: Adaptado de Stasińska et al. (2006).

pelo contínuo estelar. Uma revisão da linha teórica de Kewley et al. (2001) foi realizada por Kauffmann et al. (2003). Kauffmann et al. (2003) propõem uma nova separação para a razão de linhas $[N II] \lambda 6583/H\alpha$ versus $[O III] \lambda 5007/H\beta$, que separa galáxias SF de AGN baseado no estudo das propriedades de galáxias hospedeiras de AGNs do tipo 2, utilizando a luminosidade $[O III] \lambda 5007$ para caracterizar a intensidade da atividade nuclear, a partir de dados do SDSS. Cid Fernandes et al. (2010) propõem uma linha teórica que separa os AGNs entre Seyfert e LINER, também utilizando dados do SDSS.

Na Figura 1.5 é apresentado um exemplo de Diagrama BPT a partir das razões de linhas de $[N II] \lambda 6583/H\alpha$ versus $[O III] \lambda 5007/H\beta$, adaptado de Stasińska et al. (2006). Stasińska et al. (2006) cria este diagrama a partir de uma amostra de 10702 galáxias, obtidas com o SDSS. Cada ponto deste diagrama representa um objeto da amostra e, quanto mais escuro cada ponto, mais objetos apresentam o mesmo valor para as razões de linhas. As curvas verde e azul são as linhas teóricas propostas por Kauffmann et al. (2003) e Kewley et al. (2001), respectivamente, e a linha vermelha é a linha proposta por Cid Fernandes et al. (2010).

Outro sistema de classificação utilizado para diferenciar os mecanismos de excitação dos objetos extragalácticos é o diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2010), que utiliza a largura equivalente (*Equivalent Width* - EW) de $H\alpha$ ($EW_{H\alpha}$) versus $[N II] \lambda 6583/H\alpha$. Este diagrama é muito utilizado para identificar a fonte de ionização da emissão do tipo LINER, que pode ser devido ao AGN ou outro mecanismo de excitação, principalmente em galáxias que apresentam fracas linhas de emissão. Além disso, este diagrama possui a vantagem de utilizar somente duas linhas de emissão para realizar a classificação, visto que, em alguns telescópios

Figura 1.6 – Diagrama WHAN que separa objetos extragalácticos em *Star Forming* (SF), sAGN (Seyferts), wAGN (LINERs), *Retired Galaxies* e *Passive Galaxies*.



Fonte: Obtido em Cid Fernandes et al. (2011).

as linhas de $[O\ III] \lambda 5007$ e $H\beta$ não são observadas. Por outro lado, a desvantagem de utilizar somente duas linhas de emissão é de que informações importantes, como o grau de ionização, podem ser deixadas de lado, tornando o diagrama WHAN menos eficiente na distinção entre galáxias *Starburst* e Seyferts.

A Figura 1.6 apresenta o diagrama WHAN, que separa galáxias *Star Forming* (SF), *strong* AGN (sAGN ou Seyferts), *weak* AGN (wAGN ou LINERs), *Retired Galaxies* (RG) e *Passive Galaxies* (PG). *Retired Galaxies* é o que Cid Fernandes et al. (2011) chama de *fake* AGN pois, apesar de ser classificado corretamente como LINER em outros diagramas de diagnóstico, a origem desta emissão pode não estar associada ao AGN. Portanto, *Retired Galaxies* são objetos que já pararam de formar estrelas e que ainda contêm um pequeno reservatório de gás, que permanece sendo ionizado por estrelas quentes de baixa massa evoluídas (*hot evolved low-mass stars* - HOLMES). *Passive Galaxies* são galáxias que apresentam linhas de emissão muito fracas ou indetectáveis. Utilizando o diagrama WHAN, emissão LINER é classificada com $\log [N\ II] \lambda 6583/H\alpha > -0.4$ e $EW_{H\alpha}$ entre 3 e 6 Å.

1.4 FEEDBACK DE AGN

Durante o período de formação de uma galáxia, há alguns fenômenos físicos que influenciam diretamente no processo evolutivo destes objetos. A maneira mais eficiente de mudar o processo de crescimento de uma galáxia está em regular a formação de estrelas, de forma a propiciar ou cessar a formação estelar. Um dos principais mecanismos responsável por regular a taxa de formação estelar em galáxias é chamado de *feedback* ("retro-alimentação"), como

consequência de explosões de supernovas e atividade nuclear, por exemplo. De acordo com Silk e Mamon (2012), o *feedback* originado de explosões de supernovas causam efeitos consideráveis apenas em galáxias de baixa massa, enquanto que em galáxias de alta massa observa-se principalmente o *feedback* devido ao AGN.

O *feedback* é o efeito que o AGN tem na galáxia hospedeira a partir da energia liberada durante o processo de acreção de matéria pelo SMBH e que interage com o gás da galáxia (Fabian, 2012). As assinaturas de *feedback* geralmente se manifestam na forma de potentes jatos de partículas observados no rádio ou na forma de ventos (*outflows*). Os *outflows* de partículas energéticas são formadas nas regiões mais externas do disco de acreção ou torus, como resultado do processo de aquecimento do disco, campos eletromagnéticos e pressão de radiação (Urry; Padovani, 1995). Geralmente sua assinatura é observada na cinemática do gás da NLR (Storchi-Bergmann, 2013).

De acordo com Fabian (2012), o *feedback* do AGN pode ser separado em dois modos de acordo com a natureza da energia observada: modo radiativo (ou modo quasar) e modo cinético (ou modo rádio). No modo radiativo, a assinatura do *feedback* é observada na forma de ventos e através da emissão de radiação, que ocorre somente em AGNs de alta luminosidade, próximas à luminosidade de Eddington² ($L \sim L_{Edd}$). Neste caso, a interação dos fortes ventos ($> 500 \text{ km s}^{-1}$) originados no disco de acreção com o gás presente na galáxia pode interferir diretamente na formação estelar (Fabian, 2012). No chamado *feedback* positivo, os ventos gerados pelo AGN podem induzir a formação estelar através da compressão da matéria. Este é o modo mais raro de *feedback*. Enquanto que no chamado *feedback* negativo, a formação estelar pode ser inibida pelos ventos que podem impedir o colapso das nuvens de gás molecular e, conseqüentemente, impedir a formação de novas estrelas. Já o modo de *feedback* cinético apresenta luminosidade muito menor que a luminosidade de Eddington ($L < 0,01 L_{Edd}$), e é observada em galáxias massivas e no centro de aglomerados de galáxias (Combes, 2015). Neste modo, o *feedback* ocorre na forma de jatos de partículas relativísticas observadas no rádio, que interagem com o gás presente no halo das galáxias mantendo o gás aquecido por mais tempo. Como consequência, a formação estelar na galáxia pode ser extinta (*quench*) através do aquecimento do gás, que impede a formação de novas estrelas, bem como pela varredura que a energia diluída dos jatos entrando pelo meio interestelar são capazes de realizar, empurrando o gás presente na galáxia para o meio intra-aglomerado (Fabian, 2012). Este modo também é conhecido como um "modo de manutenção" (*maintenance-mode*) pois regula a taxa de formação estelar e o crescimento do buraco negro através do equilíbrio entre o aquecimento e resfriamento do gás da galáxia (Harrison, 2013).

Outflows de AGN, originados pelo modo quasar, são geralmente observados em pequenas escalas, da ordem de parsecs, na forma de ventos intensos que chegam a velocidades da ordem de $0,1$ a $0,2 c$ e são observados no raio-X e ultravioleta, principalmente. *Outflows* de

²Luminosidade de Eddington (ou limite de Eddington) é a luminosidade máxima que um corpo de massa M pode atingir quando há equilíbrio hidrostático, ou seja, um equilíbrio entre a força gravitacional e a pressão de radiação.

baixas velocidades (da ordem de 10^2 km s^{-1}) também são encontrados em galáxias hospedeiras de AGN, principalmente em galáxias Seyferts ou AGNs de baixa luminosidade (Riffel; Storchi-Bergmann; Riffel, 2013). Esses *outflows* são observados na cinemática das diferentes fases do gás (neutro, molecular e ionizado) na NLR, geralmente em um formato bicônico ou de somente um cone, devido a efeitos de projeção.

O impacto causado pelo *outflow* do AGN na galáxia hospedeira ainda não é totalmente conhecido. Dessa forma, diversos estudos buscam investigar as propriedades da cinemática do gás da NLR em busca de assinaturas de *feedback*, utilizando espectroscopia espacialmente resolvida (Barbosa et al., 2009).

1.5 A GALÁXIA NGC 4546

Neste trabalho estudamos a galáxia NGC 4546. Este objeto é uma galáxia *edge-on* lenticular barrada (SB0) que faz parte do aglomerado de galáxias de Virgo e está localizada a aproximadamente 17 Mpc de distância (NED³). Essa galáxia apresenta um disco de gás ionizado, de cerca de 8 kpc de extensão (Sage; Galletta, 1994), compatível com a extensão do disco estelar, mas que rotacionam em sentidos opostos com velocidades semelhantes (Galletta, 1987). De acordo com Galletta (1987), NGC 4546 foi uma das primeiras galáxias de disco no qual o fenômeno de contra-rotação, em larga escala, foi observado.

Diversos trabalhos (Galletta, 1987; Bettoni; Galletta; Oosterloo, 1991; Sage; Galletta, 1994) apontam que esta galáxia foi enriquecida com gás externo. Bettoni, Galletta e Oosterloo (1991) sugerem que a fonte de enriquecimento de gás de NGC 4546 esteja relacionada com a captura e destruição de uma pequena galáxia, a partir da observação de uma fonte brilhante próxima do centro da galáxia. Essa fonte possui um tamanho comparável a de uma grande região H II, com cerca de 175 pc de extensão, porém os autores consideram que a emissão de H α observada pode não ser uma região H II, mas possivelmente restos da pequena galáxia que foi capturada por NGC 4546. Enfim, a estrutura estelar não é perturbada pelo fenômeno que envolve a aquisição de gás pela galáxia (Bettoni; Galletta; Oosterloo, 1991).

O gás ionizado de NGC 4546 se distribui ao longo da região leste-oeste, como observado por Bettoni, Galletta e Oosterloo (1991). De acordo com Bettoni, Galletta e Oosterloo (1991), a região leste é a mais densa e é onde se encontra a maior concentração de H I, enquanto que Sage e Galletta (1994) encontra uma concentração maior de gás molecular na região oeste. Apesar da distribuição das diferentes fases do gás serem levemente diferentes, elas seguem o mesmo movimento do gás ionizado, rotacionando em sentido contrário às estrelas. O disco estelar e do gás estão em planos diferentes, com uma diferença entre o ângulo de posição (PA) do disco das estrelas e do gás de $PA_{estrelas} - PA_{gas} = -144^\circ$ (Sarzi et al., 2006), semelhante

³NASA/IPAC *Extragalactic Database* (NED), operado pelo Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech) e fundado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Link: <https://ned.ipac.caltech.edu/>

ao valor encontrado por Ricci, Steiner e Menezes (2014b) de -129° . Além disso, NGC 4546 apresenta uma barra ao longo do plano do disco, que se estende por cerca de 2 kpc, com PA = 33° (Galletta, 1987). Segundo Bettoni, Galletta e Oosterloo (1991), pseudo braços espirais podem ser observados nas extremidades da barra.

Os mapas de velocidade radial obtidos pelas observações realizadas por Sarzi et al. (2006), revelam algumas distorções e um padrão de integral na distribuição do gás ionizado até cerca de $20''$ a partir do centro. O autor sugere que estas distorções podem ser causadas por potenciais assimétricos na região central de galáxias do tipo *early type*. Ricci, Steiner e Menezes (2015) detectam a presença de estruturas cinemáticas bipolares na região circumnuclear (região externa ao raio de $1,45''$ com relação ao núcleo) do mapa de velocidade radial de NGC 4546 ao longo do PA = -130° . O perfil 1D ao longo desta estrutura revela perturbações causadas por efeitos não-Keplerianos até $1''$ a partir do núcleo (Ricci; Steiner; Menezes, 2015).

NGC 4546 apresenta atividade nuclear, observada pela primeira vez por Sarzi et al. (2006) e confirmada através de observações em 1.4 GHz (Sarzi et al., 2010) e 5 GHz (Nyland et al., 2016) obtidas com o Very Large Array (VLA), no qual é observada emissão resolvida em rádio no núcleo da galáxia, chamados de *radio cores*. De acordo com Sarzi et al. (2010), essas emissões em rádio são vestígios da acreção de matéria pelo buraco negro. Além disso, a região nuclear desta galáxia apresenta uma componente larga em $H\alpha$ com largura à meia altura (*Full Width at Half Maximum* - FWHM) de aproximadamente 2500 km s^{-1} (Ricci; Steiner; Menezes, 2014a). A presença da componente larga é consequência direta da ionização da BLR devido ao AGN, visto que esta emissão somente é observada em galáxias com núcleo ativo. Ricci, Steiner e Menezes (2014a) classificaram o AGN de NGC 4546 como Seyfert, mas ressalta que este objeto se encontra no limite de classificação entre LINER e Seyfert. Dentro da amostra dos objetos analisados por Ricci, Steiner e Menezes (2014a), esta galáxia apresenta a maior razão de Eddington (R_{edd}), a maior luminosidade bolométrica⁴ (L_{bol}) e a maior densidade ($n_e > 400 \text{ cm}^{-3}$) da amostra na região nuclear, o que leva os autores a classificar este objeto desta forma. Ricci, Steiner e Menezes (2015) notaram que a região circumnuclear de NGC 4546 possui emissão característica do tipo LINER, apresentando uma razão de $[N \text{ II}] \lambda 6583/H\alpha > 1,0$ ao longo da estrutura cinemática bipolar da galáxia.

Ricci, Steiner e Menezes (2015) demonstram que esta galáxia possui um disco de gás ionizado que revela distorções em seus mapas de velocidades radiais em todo o campo de visão (*Field of View* - FOV) do objeto (cerca de $5''$). Sarzi et al. (2006) observam estas mesmas distorções no campo de velocidades, mas em escalas da ordem de $20''$. Estas distorções podem ser causadas por efeitos não-Keplerianos, como por exemplo *outflows*, como sugerem Sarzi et al. (2006) e Ricci, Steiner e Menezes (2015). Dado que estes autores interpretam estas distorções no gás como efeitos causados pelo AGN, principalmente lembrando assinaturas de *outflows*, este fenômeno precisa ser confirmado e caracterizado, o que deverá ser feito nesta dissertação.

⁴A luminosidade bolométrica é a luminosidade total integrada em todos os comprimentos de onda.

1.6 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Com o uso da espectroscopia de campo integral (*Integral Field Spectroscopy* - IFS) é possível realizar um estudo detalhado da região central das galáxias, mapeando a cinemática do gás e das estrelas na busca por entender os processos físicos que são desencadeados pela presença do AGN. A quantidade de energia liberada por alguns AGNs tornam estes objetos um dos mais poderosos do Universo, e seus efeitos podem ser observados por toda a galáxia hospedeira, capazes de influenciar na formação estelar e, conseqüentemente, na sua evolução.

O objetivo geral deste trabalho é procurar por movimentos não-circulares associados a *outflows* e caracterizá-los, para buscar entender os efeitos causados pelo *feedback* do AGN na galáxia hospedeira, realizando uma análise detalhada da cinemática do gás da galáxia NGC 4546. Os objetivos específicos são:

- ★ Mapear a distribuição de fluxo e cinemática das estrelas e do gás ionizado e comparar com os resultados encontrados na literatura;
- ★ Elaborar mapas de razão de intensidades de linhas de emissão no intuito de identificar os mecanismos de excitação do gás da NLR;
- ★ Ajustar modelos de rotação ao campo de velocidades do gás e das estrelas, com o objetivo de identificar e caracterizar as distorções observadas;
- ★ Estimar a taxa de *outflow* (\dot{M}_{out}) de gás ionizado e a potência cinética (\dot{E}_{cin}) do *outflow* a partir da análise do mapa de resíduos do campo de velocidades;
- ★ Comparar a \dot{E}_{cin} com a luminosidade bolométrica (L_{bol}) do AGN de NGC 4546 no intuito de identificar se a potência do *outflow* é suficiente para influenciar a evolução da galáxia em grande escala.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma descrição da observação e dos processos envolvidos na redução e tratamento dos dados. O capítulo 3 apresenta os métodos envolvidos na análise dos dados, como o ajuste da componente estelar e das linhas de emissão dos cubos de dados, e uma descrição do modelo cinemático utilizado. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos através da análise dos dados, exibindo os mapas de distribuição de fluxo e cinemática do gás ionizado, bem como os mapas de razão de linhas e de excitação. No capítulo 5 são realizadas discussões comparando os resultados obtidos com os resultados na literatura, bem como a estimativa da potência cinética e taxa do *outflow*. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as perspectivas deste trabalho.

2 OS DADOS

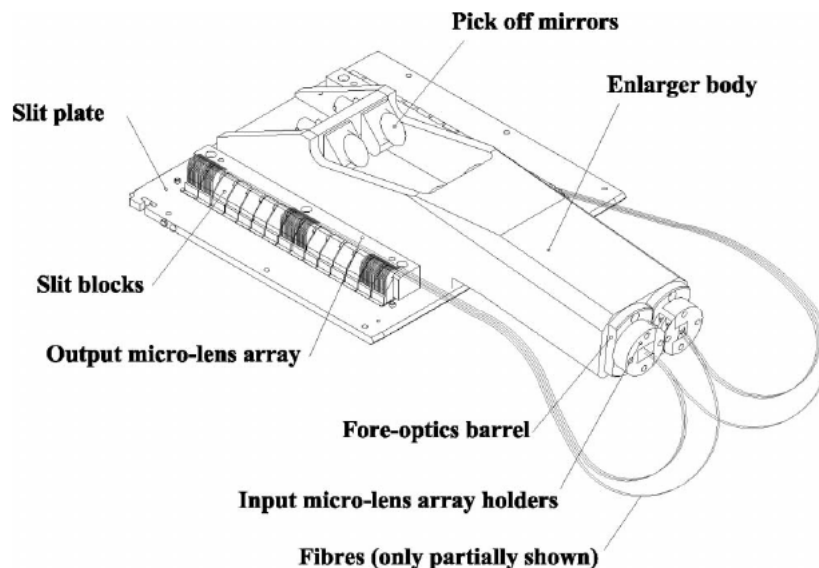
2.1 O GMOS

O observatório Gemini é formado por dois telescópios idênticos, o Gemini Norte e o Gemini Sul, localizados no Havaí e na Cordilheira dos Andes (Chile), respectivamente. Ambos os telescópios possuem 8,1 metros de diâmetro e realizam observações no óptico e infravermelho.

Neste trabalho, os dados utilizados foram obtidos com o espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrographs*) instalado no telescópio Gemini Sul. Cada telescópio possui um instrumento GMOS, os quais realizam observações dentro da faixa espectral de 3600 a 9400 Å e operam em 4 principais modos: imageamento, espectroscopia de fenda-longa, espectroscopia de multi-objetos (*Multi-Object Spectroscopy* - MOS) e espectroscopia de campo integral (*Integral Field Spectroscopy* - IFS). Utilizamos o instrumento GMOS do telescópio Gemini Sul no modo de IFS para obter os dados da galáxia NGC 4546, analisados nesta dissertação.

A Figura 2.1 apresenta uma imagem da Unidade de Campo Integral (*Integral Field Unit* - IFU, utilizada para obter IFS) do instrumento GMOS, obtida de Allington-Smith et al. (2002). O modo IFU possui dois campos de visão (*Field of View* - FOV) destinados a observar o objeto e o céu, com dois diferentes modos de observação: fenda única e fenda dupla. No modo de fenda dupla, são obtidos um total de 1500 espectros, 1000 para objeto de ciência cobrindo um FOV de 5" x 7" e 500 espectros para o céu, com um FOV de 5" x 3.5". No modo de fenda única, são obtidos 500 espectros para o objeto de ciência com FOV de 5" x 3.5", enquanto que para o céu

Figura 2.1 – Representação do IFU do GMOS.



Fonte: Obtido de Allington-Smith et al. (2002).

são obtidos 250 espectros para um FOV de $5'' \times 1,75''$. O modo fenda dupla proporciona um campo de visão máximo em troca de uma menor cobertura espectral, enquanto que no modo fenda única, tem-se uma maior cobertura espectral e um campo de visão reduzido.

O detector do GMOS consiste em três CCDs (Dispositivos de Carga Acoplada, em inglês *Charge Coupled Device*) de 2048×4608 pixels, resultando em um detector de 6144×4608 pixels, com um *gap* de $0,5 \text{ mm}$ entre eles. O CCD é um dispositivo utilizado na obtenção de imagens que, basicamente, converte fótons em elétrons, no qual cada elemento do detector é chamado de pixel.

2.2 OBSERVAÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS

Os dados foram obtidos com o telescópio Gemini Sul (programa GS-2008A-Q-51 – Investigador Principal: J. E. Steiner) em fevereiro de 2008, com o uso do *Gemini Multi-Object Spectrograph* (GMOS) no modo de espectroscopia de campo integral (*Integral Field Unit - IFU*) de fenda única. Foi realizada 1 exposição para o objeto de ciência com um tempo de observação de ~ 1200 segundos. No programa GS-2008A-Q-51 foi utilizada a rede de difração R831-G5322, que cobre uma faixa espectral de 4736 a 6806 Å com comprimento de onda central 5800 Å e resolução espectral de 1,3 Å, estimada a partir da medida da largura a meia altura (*Full Width at Half Maximum – FWHM*) em linhas de emissão do céu (Ricci; Steiner; Menezes, 2014b). As observações de NGC 4546 foram realizadas em condições de *seeing* de 0,71 arcsec. O valor do *seeing* foi medido a partir da determinação da FWHM da distribuição de fluxo de estrelas de campo na imagem de aquisição da galáxia obtida com o imageador do GMOS no filtro *r* (considerando o sistema do SDSS).

O processo de redução e tratamento dos dados foi realizado por Ricci (2013) e são descritos a seguir. A redução dos dados foi realizada utilizando o pacote Gemini do *software* de análise e redução de dados IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) seguindo as seguintes etapas: determinação do *trim* da imagem, subtração de *bias*, divisão por *flat-field*, remoção de raios cósmicos, extração dos espectros, calibração em comprimento de onda, subtração do céu, calibração em fluxo e montagem do cubo de dados (Menezes, 2012).

O primeiro passo na redução de dados é determinar o *trim*, onde se busca encontrar a região útil da imagem. Para tal, indica-se uma região na borda das imagens que deve ser descartada utilizando a tarefa **gfreduce** e deve ser aplicada em todas as imagens, pois apresenta grandes variações causadas pelo CCD.

O segundo passo é remover os efeitos aditivos gerados durante a leitura dos elétrons pelo CCD. Esse ruído de leitura é chamado de *bias*. As imagens *bias* consistem em imagens com tempo de exposição nulo ou de 1 segundo (muito baixo, comparado as observações do objeto de ciência), que devem ser combinadas e subtraídas das imagens utilizando a tarefa **gfreduce**.

Além do ruído de leitura, deve-se remover as diferenças de resposta das fibras ópticas do

instrumento. Para tal, faz-se um conjunto de imagens de *flat-field*, as quais são obtidas expondo o CCD a uma fonte de luz uniforme (lâmpada e céu - *twilight*). Com a tarefa **gfextract**, extrai-se os espectros das imagens *flat-field* da lâmpada para fazer uma média, e em seguida ajusta-se um polinômio a este espectro médio. O espectro médio deve ser dividido por todos os espectros de *flat-field* da lâmpada e multiplicados pelo espectro de *twilight* para cada fibra, em busca de uma curva de resposta que descreva as variações na sensibilidade do detector. Finalmente, com a tarefa **gfresponse**, cria-se um mapa de resposta que deve ser dividido pelas imagens do objeto.

Removidos os efeitos do detector, deve-se remover os raios cósmicos que são detectados pelo CCD mas que não fazem parte do objeto observado. Raios cósmicos são partículas altamente energéticas provenientes do espaço, que penetram na atmosfera e chegam até a superfície. A remoção dos raios cósmicos foi realizada com o algoritmo LACOS (van Dokkum, 2001), que utiliza o detector de bordas com o operador Laplaciano, muito usado para identificar os limites nos quais a intensidade dos pontos em imagens digitais muda de repente.

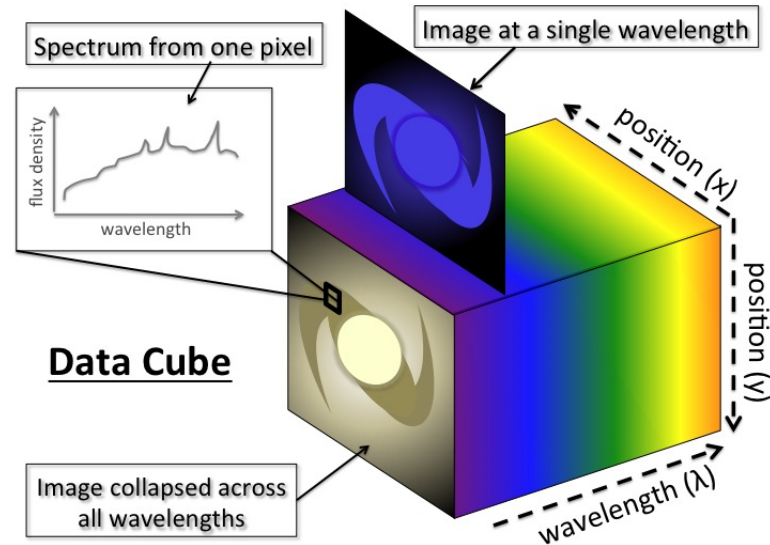
O espectro observado não possui nenhum comprimento de onda associado, desta forma, foi realizada a calibração em comprimento de onda com a tarefa **gftransform**. Nesta etapa, utiliza-se o espectro de uma lâmpada conhecida, que foi observada no mesmo dia, e a tarefa faz a comparação do espectro da lâmpada calibrado com o espectro do objeto. E com a tarefa **gfextract** são extraídos espectros unidimensionais do objeto de ciência.

A atmosfera também emite radiação, portanto, deve ser removida das imagens do objeto em estudo. Dessa forma, para que essa contribuição seja removida, faz-se uma observação do céu apontando o telescópio para uma região livre de objetos celestes, que mais tarde deve ser subtraída da imagem do objeto utilizando a tarefa **gfskysub**. Como descrito anteriormente, as observações do céu e do objeto de ciência são realizadas simultaneamente, com fibras dedicadas a observação do céu.

O próximo passo é realizar a calibração em fluxo, visto que o espectro extraído e calibrado em comprimento de onda, não possui unidades de fluxo, somente a contagem de fótons detectados. Dessa forma, com a tarefa **gfcilibrate** transforma-se o espectro em um gráfico com o fluxo em função do comprimento de onda. Para tal, utiliza-se o espectro de uma estrela padrão para fazer a transformação da contagem de fótons para o fluxo correspondente. A estrela padrão de fluxo é observada na mesma noite de observação do objeto de ciência e possui fluxos em diferentes comprimentos de onda previamente conhecidos.

Feito todo o processo básico de redução de dados, o próximo passo é fazer a montagem do cubo de dados utilizando a tarefa **gfcube**. Neste processo, os dados são arranjados de forma a criar um conjunto de dados com informação em três dimensões (x, y, z): duas dimensões espaciais (x, y) e uma dimensão espectral (z), como mostra a Figura 2.2. O cubo de dados foi construído com uma dimensão espacial de $0,05 \text{ arcsec}^2$ (segundos de arco) por píxel, padrão de saída da tarefa **gfcube**.

Figura 2.2 – Representação de um cubo de dados.



Fonte: Obtido de <https://astro3d.org.au/research/>.

2.3 TRATAMENTO DOS DADOS

Após todo o processo básico de redução é possível, ainda, identificar que existem algumas imperfeições nos cubos de dados causadas pelo instrumento de observação, como ruídos de alta frequência espacial, assinaturas instrumentais de baixa frequência espacial e espectral, além dos efeitos causados pela refração atmosférica diferencial.

Os cubos de dados obtidos através de observações com o telescópio Gemini devem passar por um tratamento para remover os efeitos causados pela refração atmosférica diferencial, visto que o telescópio Gemini não possui um corretor de dispersão atmosférica. A correção destes efeitos é importante pois pode afetar consideravelmente as medidas do objeto de estudo, principalmente no óptico, causando um deslocamento espacial em função do comprimento de onda. Em outras palavras, a sua posição no cubo de dados pode variar para imagens de comprimento de onda diferentes. Para realizar a correção, foram utilizadas as equações de Bönsch e Potulski (1998) e Filippenko (1982) cuja função é descrever o comportamento da dispersão da luz para cada comprimento de onda na atmosfera.

A aplicação de filtros é comumente utilizada na remoção de imperfeições e ruídos em imagens, que aparecem devido aos diversos procedimentos ao qual foi submetida. Os dois tipos de filtros mais utilizados no domínio das frequências são os passa-baixa e passa-alta. Como o próprio nome sugere, os filtros passa-baixa são utilizados para remover frequências altas enquanto que os filtros passa-alta removem frequências baixas. Os ruídos de alta frequência presentes em NGC 4546 foram removidos através da aplicação da filtragem espacial de Butterworth (Gonzalez; Woods, 2002), aplicada diretamente no domínio das frequências das imagens através da transformada de Fourier. A equação do filtro de Butterworth (passa-baixa) é dada por:

$$H_{\text{Butterworth}}(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\sqrt{\left(\frac{u - u_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{v - v_0}{b}\right)^2} \right]^{2n}}, \quad (2.1)$$

onde u_0 e v_0 são as frequências de referência para u e v , respectivamente, u e v são as coordenadas com relação ao centro da imagem, ambos correspondentes à transformada de Fourier, a e b são as frequências de corte e n é o índice do filtro. Para NGC 4546 foi utilizada a frequência de corte $a = b = 0,20 F_{NY}$, onde F_{NY} é a frequência de Nyquist, e o índice do filtro $n = 2$ (Ricci, 2013).

Após a filtragem de Butterworth foi realizada a remoção das assinaturas instrumentais de baixa frequência espacial e espectral. Para tal, utilizou-se a técnica de Tomografia PCA (Steiner et al., 2009) que consiste na aplicação da análise de componentes principais nos cubos de dados. Essas assinaturas instrumentais se apresentam como faixas verticais ou horizontais nas imagens e como uma correlação de baixas frequências entre os comprimentos de onda.

O último procedimento realizado no tratamento dos dados foi a deconvolução de Richardson-Lucy (Richardson, 1972; Lucy, 1974), um processo iterativo capaz de reverter o efeito de uma convolução. No caso das observações astronômicas, as imagens de um objeto obtidas em solo terrestre são convoluídas pela PSF (*Point Spread Function*). Isso quer dizer que a convolução causada pela atmosfera faz com que a imagem de objeto pontual, como por exemplo uma estrela, se apresente de forma espalhada. Conhecendo-se a PSF e a imagem observada, é possível obter a imagem original a partir do processo de deconvolução, supondo que a PSF assuma a forma de uma função gaussiana com FWHM igual ao *seeing* da observação do objeto. Uma descrição mais detalhada sobre este processo, e os demais, pode ser encontrado em Menezes (2012) e em Ricci (2013).

O resultado de cada um dos procedimentos descritos nas seções acima, é um cubo de dados para NGC 4546 com um FOV de $5'' \times 3.5''$, com escala espacial de 82 pc/arcsec . O cubo de dados é formado por 59 spaxels no eixo x e 90 spaxels no eixo y , resultando em 5310 espectros. *Spaxel* é o nome que se dá a um pixel espacial.

3 ANÁLISE

Com o intuito de realizar um estudo detalhado sobre a distribuição de fluxo e cinemática do gás ionizado na região central da galáxia NGC 4546, foi preciso subtrair a componente estelar dos espectros do cubo de dados. Após a síntese espectral, foram construídos mapas bidimensionais para análise da distribuição de fluxo e cinemática do gás para a galáxia em estudo. A seguir, é feita uma descrição detalhada sobre os processos envolvidos em cada uma das etapas.

3.1 SUBTRAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS POPULAÇÕES ESTELARES

Utilizando o método *Penalized PiXel Fitting* (PPXF) descrito por Cappellari e Emsellem (2004), é possível realizar a subtração da contribuição da população estelar do cubo de dados, o que é essencial para a análise da cinemática e emissão do gás. Além disso, esta técnica nos fornece medidas para a cinemática estelar a partir do ajuste do espectro observado de uma galáxia. O método PPXF cria um espectro modelo $G_{mod}(x)$ para a galáxia a partir da convolução de espectros *templates*, que representam as populações estelares presentes na galáxia $T(x)$, com a distribuição de velocidades na linha de visada (*Line-of-sight velocity distribution* - LOSVD). Então, o espectro modelo é comparado com o espectro observado até o melhor ajuste ser encontrado. Uma vez encontrada uma solução adequada para cada *spaxel*, faz-se a subtração da componente estelar do espectro observado.

Para minimizar a incompatibilidade entre os espectros modelo e observado, o PPXF possibilita o uso de uma biblioteca de espectros *templates*, no qual é possível fornecer pesos diferentes para cada um deles. O espectro modelo da galáxia é dado pela seguinte equação:

$$G_{mod}(x) = \sum_{k=1}^K w_k [B \otimes T_k](x) + \sum_{l=0}^L b_l P_l(x), \quad (3.1)$$

com $w_k \geq 0$. Nesta fórmula, $B(x) = L(cx)$ é a função de alargamento, T_k é o k -ésimo *template* da base de espectros, $L(v)$ é a LOSVD, c é a velocidade da luz e P_l são os polinômios de Legendre de ordem l . No parâmetro w_k se define o peso dado para a contribuição de cada *template* de base.

A função de $L(x)$ é dada por uma série de Gauss-Hermite:

$$L(v) = \frac{e^{-(1/2)y^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right], \quad (3.2)$$

onde $y = (v - V)/\sigma$, V é a velocidade sistêmica da galáxia, v é a velocidade radial medida

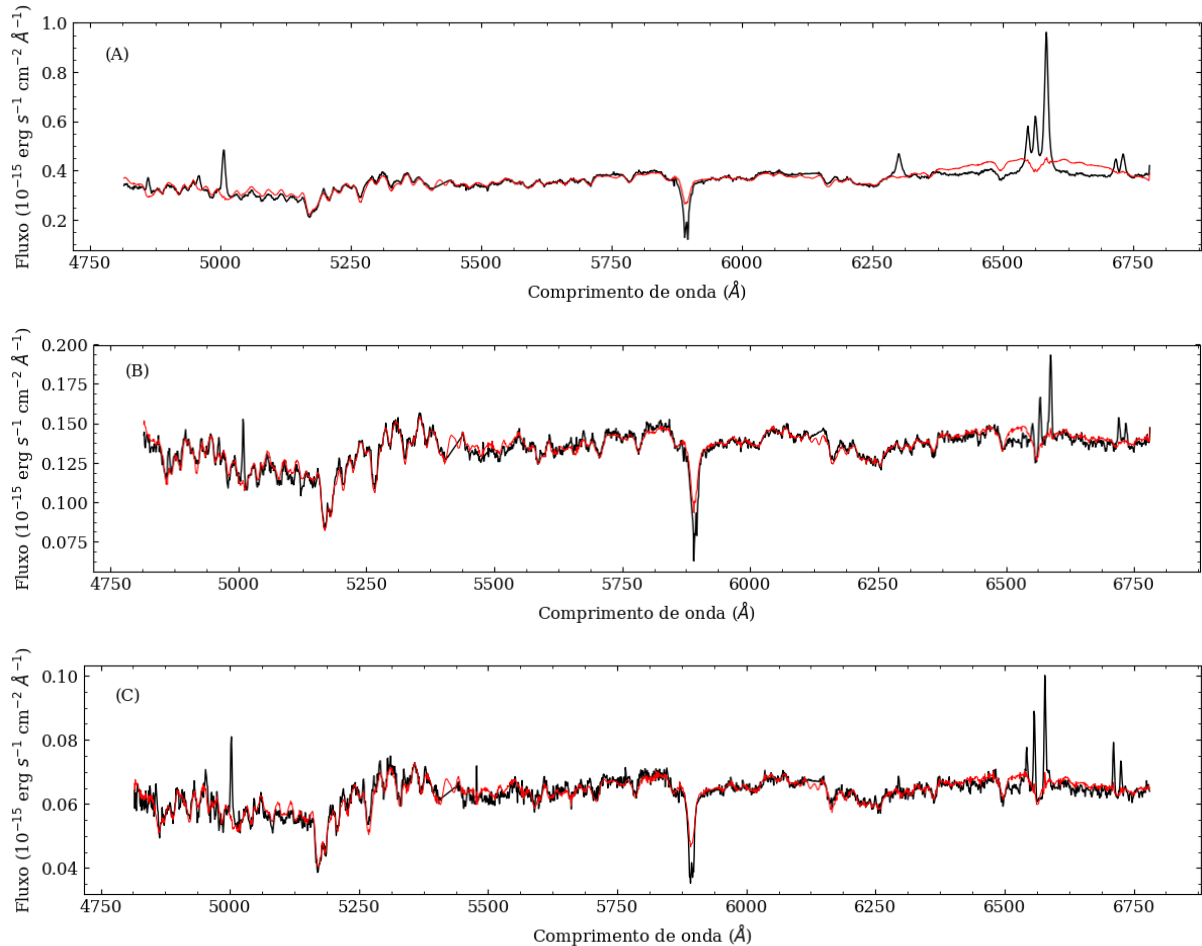
pelo observador, σ é a dispersão de velocidades, H_m são os polinômios de Hermite e h_m os momentos de Gauss-Hermite.

Os *templates* para o ajuste podem ser formados por modelos de populações estelares ou por um conjunto de espectros estelares. Modelos de populações estelares são criados a partir da teoria de evolução estelar, no qual são levados em considerações parâmetros intrínsecos das estrelas, como a temperatura efetiva T_{eff} , a aceleração da gravidade na superfície da estrela e a metalicidade [Fe/H] das estrelas (Sánchez-Blázquez et al., 2006). Para um modelo de populações estelares completo, é necessário que se leve em consideração todos os estágios possíveis de evolução das estrelas. Quando não há um interesse em investigar as propriedades da componente estelar, como idades e metalicidades, é possível utilizar *templates* que são formados a partir do conjunto de diversos espectros estelares.

Para realizar o ajuste do espectro contínuo e de absorção da galáxia NGC 4546, foi utilizada a biblioteca MILES (Sánchez-Blázquez et al., 2006; Falcón-Barroso et al., 2011) como espectros *templates*. Esta base é composta por espectros de 985 estrelas, dentro de um intervalo espectral de 3500 a 7500 Å e resolução espectral de 2.3 Å de FWHM (Sánchez-Blázquez et al., 2006), com metalicidades [Fe/H] que variam entre -2.93 a +1.65 e temperaturas T_{eff} de 3000K a 36000K (Cenarro et al., 2007).

Nesta dissertação não estamos interessados em investigar as propriedades físicas das populações estelares da galáxia, como idades e metalicidades. Entretanto, a subtração da contribuição destas é essencial para estudar a origem da emissão do gás. Na Figura 3.1 são apresentados exemplos do ajuste dos espectros em três diferentes posições: posição A (núcleo da galáxia), posição B (0,8'' a sudoeste do núcleo) e posição C (1,0'' a nordeste do núcleo), no qual o espectro observado está representado em preto e o modelo ajustado em vermelho. De maneira geral, o espectro da galáxia é bem reproduzido pelo modelo, com exceção da linha Na I $\lambda\lambda 5890,5896$ (Na D), a qual comumente apresenta uma grande contribuição de absorção devido ao meio interestelar (Heckman et al., 2000). Dessa forma, é esperado que o modelo não reproduza esta transição adequadamente, uma vez que os *templates* incluem somente espectros estelares. No espectro nuclear observa-se que o modelo parece superestimar a contribuição do contínuo estelar em regiões do espectro com comprimentos de onda maiores do que 6400 Å, possivelmente devido a inclusão de linhas de emissão nos pontos considerados no ajuste. Isso pode levar a obtenção de fluxos subestimados para as linhas de emissão nesta região espectral, porém isso ocorre somente na região nuclear da galáxia e não tem efeito em medidas da cinemática do gás e dos fluxos em localizações extra-nucleares. Uma análise mais cuidadosa dos ajustes dos espectros na região nuclear deverá ser realizada posteriormente.

Figura 3.1 – Exemplos de ajustes dos espectros de NGC 4546 para três diferentes posições. Painel superior: núcleo da galáxia (posição A). Painel central: $1,0''$ a sudoeste do núcleo (posição B). Painel inferior: $1,3''$ a nordeste do núcleo (posição C). O espectro observado é mostrado em preto e o espectro ajustado em vermelho.



Fonte: A autora

3.2 AJUSTES DAS LINHAS DE EMISSÃO

Para obter a distribuição de fluxo e cinemática do gás de diferentes tipos de objetos, ajustou-se o perfil das linhas de emissão usando funções Gaussianas. Para realizar tal tarefa, foi utilizada uma versão modificada da rotina PROFIT (*line-PROFILE FITting*), desenvolvida por Riffel (2010) em linguagem IDL. Com o PROFIT, é possível fazer o ajuste das linhas de emissão a partir de curvas gaussianas ou séries de Gauss-Hermite e, como saída, fornece arquivos bidimensionais em formato *fits* contendo a distribuição de fluxo, velocidade radial, dispersão de velocidades e momentos de Gauss-Hermite (h_3 e h_4).

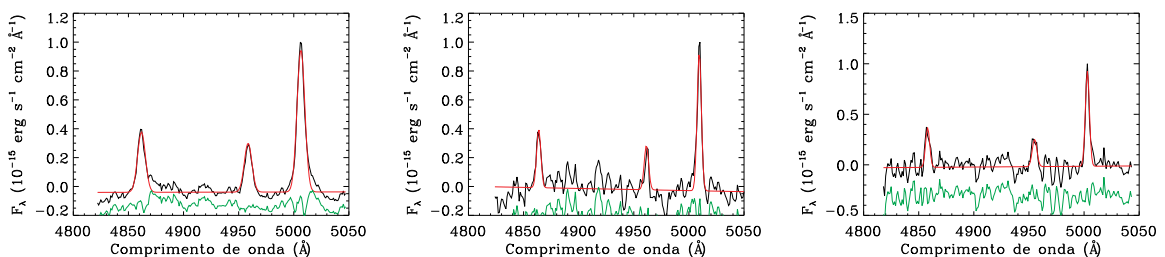
Neste trabalho ajustamos cada linha de emissão por uma curva Gaussiana. Para cada posição espacial, a rotina ajusta os perfis das linhas de emissão e o contínuo adjacente, o que é representado por uma equação linear. Chutes iniciais para cada parâmetro são fornecidos

pelo usuário e a rotina utiliza o algoritmo MPFITFUN escrito em linguagem IDL para realizar a solução do problema de mínimos quadrados não-lineares (Markwardt, 2009). Os fluxos são obtidos a partir da integração numérica da distribuição Gaussiana ajustada, as velocidades são obtidas utilizando a equação para o efeito Doppler relativístico a partir do comprimento de onda central da Gaussiana ajustada e a dispersão de velocidades é um dos parâmetros do ajuste. Além de estimativas dos parâmetros físicos, a rotina PROFIT produz como saída estimativas para suas incertezas.

Com o PROFIT foi realizado o ajuste das linhas de emissão de $H\beta$ $\lambda 4861$, $[O III]$ $\lambda\lambda 4959,5007$, $H\alpha$ $\lambda 6563$, $[N II]$ $\lambda\lambda 6548,6583$, $[O I]$ $\lambda 6300$ e $[S II]$ $\lambda\lambda 6716,6730$ a partir de curvas Gaussianas adotando o seguinte procedimento: as linhas de $H\alpha + [N II]$ foram ajustadas simultaneamente, no qual a velocidade e largura das linhas de $[N II]$ $\lambda\lambda 6548,6583$ foram mantidas fixas, assim como a razão das intensidades das linhas $I([N II] \lambda 6583)/I([N II] \lambda 6548)$ foi fixada ao seu valor teórico (~ 3) (Osterbrock; Ferland, 2006). Como as linhas de $[N II]$ $\lambda\lambda 6548,6583$ são originadas sob as mesmas condições, não há problema em mantê-las fixas. O mesmo procedimento foi adotado para ajustar as linhas $H\beta + [O III]$. Enquanto que as linhas do $[S II]$ $\lambda\lambda 6716,6730$ também foram ajustadas mantendo-se acopladas suas larguras e velocidades.

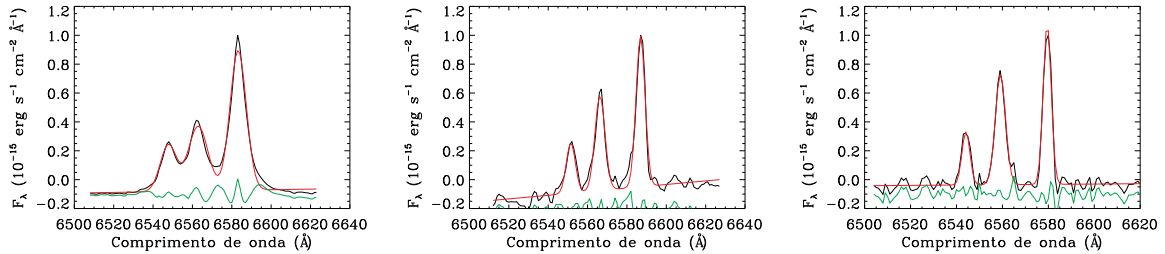
Nas Figuras 3.2 e 3.3 são mostrados exemplos de ajuste realizados pelo PROFIT para as linhas de $H\beta + [O III]$ e $H\alpha + [N II]$, respectivamente. O painel esquerdo da Figura 3.2 apresenta o ajuste da linha de $H\beta + [O III]$ para o núcleo da galáxia (posição A), o painel central apresenta o ajuste da posição $1,0''$ a sudoeste do núcleo (posição B) e o painel direito apresenta o ajuste da posição $1,3''$ a nordeste do núcleo. O espectro observado está representado em preto, o perfil ajustado em vermelho e os resíduos do ajuste em verde. O mesmo vale para a Figura 3.3. Observa-se que, em todos os casos, os ajustes reproduzem satisfatoriamente os perfis observados.

Figura 3.2 – Exemplos de ajustes das linhas de emissão $H\beta$ $\lambda 4861$ e $[O III]$ $\lambda\lambda 4959,5007$ em três posições da galáxia. Painel esquerdo: núcleo da galáxia (posição A). Painel central: $1,0''$ a sudoeste do núcleo (posição B). Painel direito: $1,3''$ a nordeste do núcleo (posição C). Os perfis observados são mostrados em preto, os ajustes em vermelho e os resíduos em verde.



Fonte: A autora

Figura 3.3 – Exemplos de ajustes das linhas de emissão H α λ 6563 e [N II] $\lambda\lambda$ 6548,6563 em três posições da galáxia. Painel esquerdo: núcleo da galáxia (posição A). Painel central: 1,0'' a sudoeste do núcleo (posição B). Painel direito: 1,3'' a nordeste do núcleo (posição C). Os perfis observados são mostrados em preto, os ajustes em vermelho e os resíduos em verde.



Fonte: A autora.

3.3 MODELO DE ROTAÇÃO

Para a obtenção de parâmetros cinemáticos, como a velocidade sistêmica, ângulo de posição da linha dos nodos e inclinação do disco da galáxia, ajustamos o campo de velocidades das estrelas e do gás por um modelo analítico simples (Bertola et al., 1991). Além da obtenção dos parâmetros cinemáticos da galáxia, este procedimento permite isolar componentes devido a movimentos não-circulares possivelmente presentes no campo de velocidades do gás.

Para o ajuste do campo de velocidades observado, assume-se órbitas circulares no plano da galáxia com velocidades circulares dadas por:

$$v_c(r) = \frac{Ar}{(r^2 + c_0^2)^{p/2}}, \quad (3.3)$$

onde A é a amplitude da curva de rotação, c_0 é o parâmetro de concentração e p é um parâmetro de ajuste, onde $p = 1$ indica que a curva de rotação é assintoticamente plana e $p = 3/2$ o sistema possui uma massa total finita (Bertola et al., 1991). No centro a curva de rotação aumenta linearmente e, conforme o raio aumenta, r é proporcional a $r^{(1-p)}$ (Bertola et al., 1991). A partir da equação dada por van der Kruit e Allen (1978), a velocidade radial em uma determinada posição no céu (R, Ψ) pode ser relacionada com a velocidade v_c . A partir dessa relação, Bertola et al. (1991) encontra explicitamente a seguinte equação:

$$v_{mod}(R, \Psi) = v_{sis} + \frac{AR \cos(\Psi - \Psi_0) \sin \theta \cos^p \theta}{\{R^2 [\sin^2(\Psi - \Psi_0) + \cos^2 \theta \cos(\Psi - \Psi_0)] + c_0^2 \cos^2 \theta\}^{p/2}}, \quad (3.4)$$

onde θ é a inclinação do disco em relação ao plano do céu (com $\theta=0$ para um disco *face-on* e $\theta=90^\circ$ para um disco *edge-on*), Ψ_0 é o ângulo de posição da linha dos nodos, v_{sis} é a velocidade sistêmica da galáxia e R é a distância em relação ao núcleo da galáxia, projetada no plano do céu.

O método de ajuste de mínimos quadrados não lineares de Levenberg-Marquardt foi

usado para encontrar o melhor ajuste entre o modelo e o campo de velocidades observado. Esse ajuste foi feito através da rotina MPFITFUN (Markwardt, 2009), escrita em linguagem IDL, no qual chutes iniciais para os parâmetros do ajuste são fornecidos pelo usuário.

Neste trabalho, ajustamos o campo de velocidades estelar de NGC 4546 mantendo todos os parâmetros livres. Já para o campo de velocidades do gás, mantivemos a inclinação do disco e a posição do centro cinemático fixos aos valores obtidos a partir do ajuste do campo de velocidade estelar. Este procedimento reduz o número de parâmetros livres e possibilita a detecção de componentes cinemáticos do gás que não podem ser atribuídos a rotação em um disco, a partir da construção de mapas de resíduos entre os campos de velocidades observado e o modelo. A análise destes mapas de resíduos permite associar estes movimentos não circulares a efeitos produzidos pelo AGN, como ejeções de matéria do núcleo ou escoamentos de gás em direção ao centro.

4 RESULTADOS

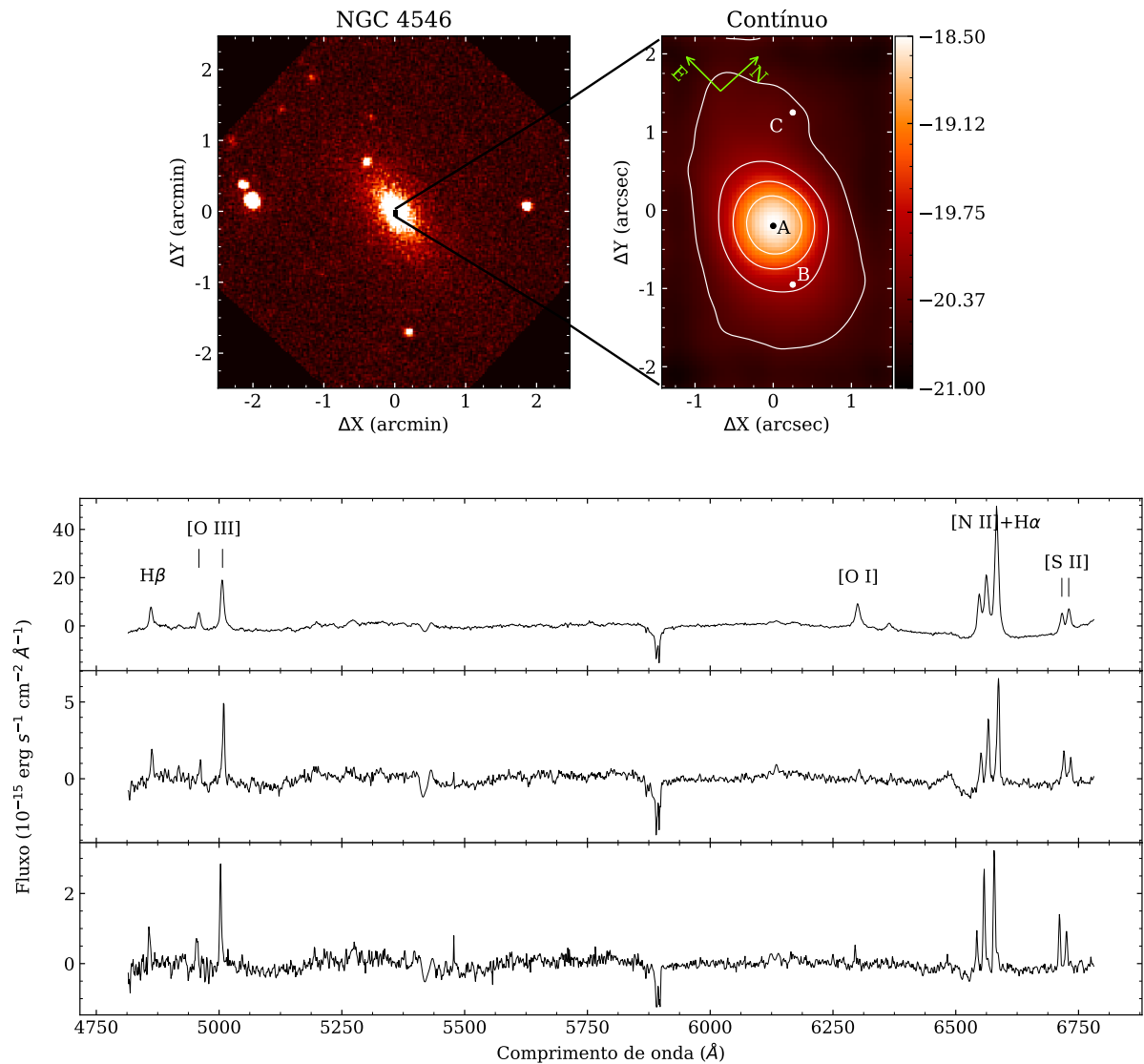
Neste capítulo, são apresentados os mapas bidimensionais para fluxos de linhas de emissão, razões entre intensidades de linhas, largura equivalente, velocidade radial e dispersão de velocidades do gás e das estrelas, construídos a partir das medidas realizadas utilizando-se a metodologia descrita no capítulo anterior. Apresenta-se também os diagramas diagnóstico de razões de linhas, construídos a partir das medidas de fluxo das linhas de emissão.

O painel superior esquerdo da Figura 4.1 apresenta uma imagem em grande escala da galáxia NGC 4546 no ultravioleta obtida com o telescópio espacial *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX). Esta imagem foi originalmente apresentada em Gil de Paz et al. (2007) e retirada da base de dados NASA/IPAC *Extragalactic Database* (NED). A imagem em grande escala da galáxia foi rotacionada de tal forma a possuir a mesma orientação das observações. A emissão ultravioleta traça a emissão de estrelas jovens e observa-se uma maior extensão ao longo da direção leste – oeste. O retângulo preto central representa o campo de observação do instrumento GMOS. O painel superior direito apresenta o mapa de fluxo no contínuo obtido a partir do cubo de dados do GMOS, realizando-se uma média do fluxo no contínuo ajustado pelo código PPXF, descrito na Seção 3.1. Os pontos $x = 0$ e $y = 0$ é definido como o *spaxel* central do cubo de dados para todos os mapas de fluxo e cinemática. Observa-se que a emissão no contínuo na região central da galáxia apresenta uma morfologia similar a vista em grande escala, com a emissão mais intensa observada ao longo do eixo leste – oeste, aproximadamente. Os pontos A, B e C representam as posições do núcleo da galáxia, $1,0''$ a sudoeste do núcleo e $1,3''$ a nordeste do núcleo, respectivamente. Esses pontos indicam as posições no qual foram extraídos espectros, integrados dentro de uma abertura circular de $0,3''$ e mostrados no painel inferior da Figura 4.1. Nestes espectros, a contribuição da população estelar foi subtraída e foram corrigidos pelo efeito Doppler. As principais linhas de emissão observadas são identificadas no espectro nuclear: $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$, $\text{H}\beta$, $[\text{O I}]\lambda 6300$, $[\text{N II}]\lambda\lambda 6548, 6583$, $\text{H}\alpha$ e $[\text{S II}]\lambda\lambda 6717, 6731$. Estas linhas são detectadas em praticamente todo o campo do GMOS, o que possibilitou a realização de ajustes de seus perfis e a obtenção de medidas de fluxos, velocidades e dispersão de velocidades ponto-a-ponto na galáxia.

4.1 MAPAS DE FLUXOS

Os mapas bidimensionais para a distribuição de fluxos das linhas de emissão $[\text{O III}]\lambda 5007$, $\text{H}\alpha \lambda 6563$, $[\text{N II}]\lambda 6583$, $[\text{O I}]\lambda 6300$ e $[\text{S II}]\lambda 6734$ são apresentadas na Figura 4.2. Esta figura mostra ainda uma imagem do contínuo obtido realizando-se uma média dos fluxos em uma janela espectral de 4815 \AA a 6780 \AA . Os mapas de fluxos das linhas de emissão foram construídos a partir dos ajustes de Gaussianas aos perfis das mesmas em cada posição da galáxia. Cada

Figura 4.1 – Painel superior esquerdo: Imagem da galáxia NGC 4546 em grande escala no ultravioleta obtida pelo telescópio GALEX, e retirado da base de dados NED. O retângulo central indica o FOV da observação do GMOS-IFU, com dimensão espacial de $3,5 \times 5$ segundos de arco. Painel superior direito: Mapa do contínuo da galáxia NGC 4546 em $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ e em escala logarítmica. Ambas as imagens possuem a mesma orientação. Painel inferior: Espectros da componente do gás de cada um dos pontos indicados no mapa do contínuo estelar, para uma abertura de 0,3 segundos de arco.



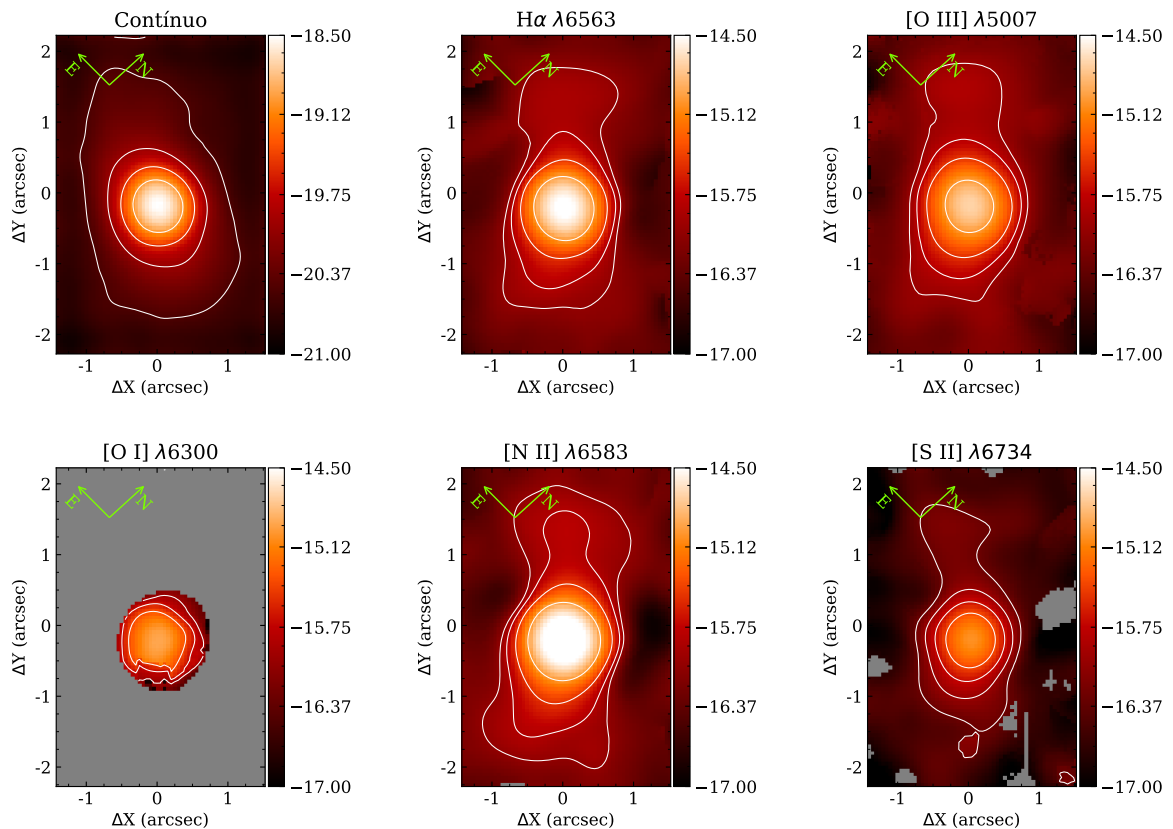
Fonte: A autora.

linha foi ajustada por uma única Gaussiana, que se mostrou adequada para reproduzir os perfis observados em todas as posições do cubo. Os contornos brancos sobrepostos aos mapas têm a finalidade proporcionar uma melhor visualização das distribuições de fluxos. As barras de cores representam os fluxos observados em escala logarítmica, em unidades de $\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ fibra}^{-1}$.

Observa-se emissão estendida na direção nordeste–sudoeste em praticamente todo o

campo do GMOS para todas as linhas de emissão, com exceção da linha [O I] $\lambda 6300$, que apresenta emissão somente dentro do raio de $0,5''$ a partir do núcleo da galáxia. O pico de fluxo é observado no núcleo da galáxia para todas as linhas de emissão. É possível observar na Figura 4.2 que o contínuo estelar e as distribuições de fluxos das linhas de emissão não possuem a mesma orientação. O contínuo estelar é mais alongado na direção leste-oeste ($\Psi_0 \approx 72^\circ$), enquanto que os maiores valores de fluxos das linhas de emissão estão distribuídos assimetricamente ao longo da direção nordeste-sudoeste ($\Psi_0 \approx -134^\circ$).

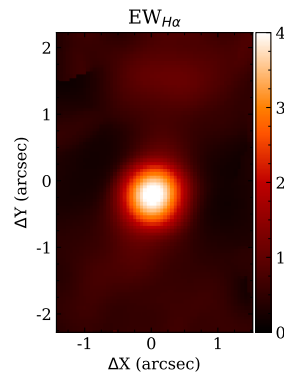
Figura 4.2 – Mapa do contínuo estelar e mapas de fluxo das linhas de emissão de NGC 4546. Os mapas estão em escala logarítmica e a barra de cor indica a intensidade em $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ para o contínuo e em $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ para as linhas de $\text{H}\alpha$ $\lambda 6563$, [O III] $\lambda 5007$, [O I] $\lambda 6300$, [N II] $\lambda 6583$ e [S II] $\lambda 6734$.



Fonte: A autora.

A Figura 4.3 apresenta o mapa da largura equivalente de $\text{H}\alpha$ em \AA para NGC 4546. A região nuclear apresenta um pico de emissão, com $\text{EW}_{\text{H}\alpha} > 3\text{\AA}$ dentro de um raio de $0,25''$, característico de emissão LINER. Para regiões externas ao raio de $0,25''$ até $0,75''$ observa-se valores de $\text{EW}_{\text{H}\alpha}$ entre $0,5$ e 3\AA , que se distribui assimetricamente ao longo da direção nordeste-sudoeste.

Figura 4.3 – Mapa da largura equivalente de $H\alpha$ ($EW_{H\alpha}$) de NGC 4546, em \AA .

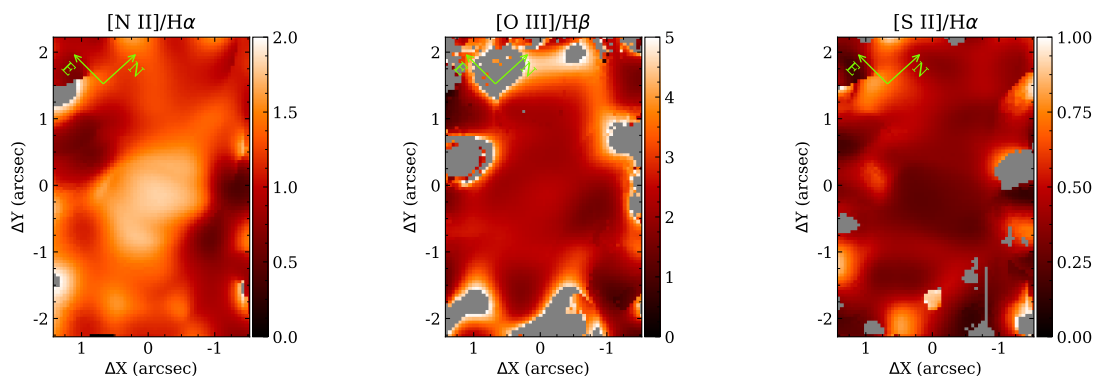


Fonte: A autora.

4.2 RAZÕES DE FLUXOS DE LINHAS DE EMISSÃO E DIAGRAMAS DE DIAGNÓSTICO

Os mapas da razão de fluxos das linhas de emissão¹ $[N II]/H\alpha$, $[O III]/H\beta$ e $[S II]/H\alpha$, em escala logarítmica, são apresentados na Figura 4.4. O mapa de $[N II]/H\alpha$, apresentado no painel esquerdo desta figura, revela valores de razão maiores que a unidade para praticamente todas as regiões do mapa. Os maiores valores desta razão de linhas são observados na região que coincide com o núcleo da galáxia, apresentando $[N II]/H\alpha > 1,7$. Essa estrutura de maiores valores se distribui ao longo da direção norte-sul, de forma assimétrica. Cabe ressaltar que os valores absolutos da razão $[N II]/H\alpha$ para o núcleo da galáxia possuem uma maior incerteza, devido ao ajuste da contribuição da população estelar no núcleo ser subestimado na região das linhas envolvidas nesta razão, conforme já mencionado na Seção 3.1. Porém, as linhas de $H\alpha$ e $[N II]\lambda 6583$ parecem ser afetadas na mesma proporção por este erro.

Figura 4.4 – Mapas de razões das intensidades das linhas de NGC 4546, em escala logarítmica.



Fonte: A autora.

No painel central da Figura 4.4, é apresentado o mapa da razão de linhas de $[O III]/H\beta$.

¹Para simplificar, a razão das linhas de emissão $[N II]\lambda 6583/H\alpha$, $[O III]\lambda 5007/H\beta$ e $([S II]\lambda 6716 + [S II]\lambda 6734)/H\alpha$ serão denotados como $[N II]/H\alpha$, $[O III]/H\beta$ e $[S II]/H\alpha$, respectivamente.

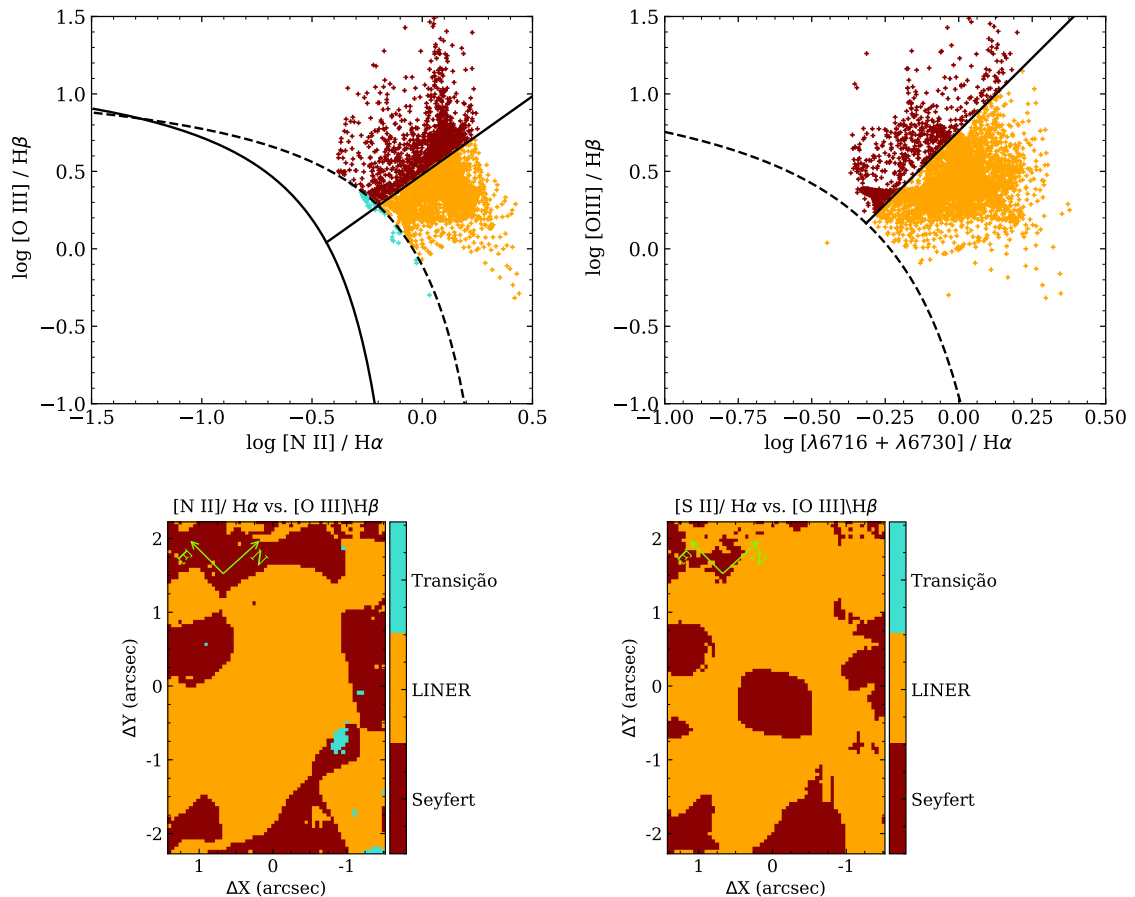
Na região central são encontrados valores de $[O\ III]/H\beta > 2$, enquanto que na região mais externa (cerca de $1''$ do centro) são encontrados valores para a razão acima de 3. O mapa de fluxo de $H\beta$ não é apresentado na Seção 4.1 pois a sua distribuição é semelhante à distribuição de fluxo de $H\alpha$, uma vez que as duas linhas de emissão são formadas na mesma região. Porém, a emissão de $H\beta$ é muito fraca ou não é detectada nas regiões periféricas do campo de visão do cubo de dados. Dessa forma, os maiores valores de $[O\ III]/H\beta$ para as regiões periféricas do mapa devem ser considerados com cautela, considerando que os fluxos da linha de emissão de $H\beta$ podem ser superestimados. Além disso, nestas regiões a razão sinal-ruído no contínuo é menor, o que introduz uma maior incerteza no ajuste da contribuição da população estelar, a qual afeta principalmente a linha de $H\beta$.

O painel direito da Figura 4.4 apresenta o mapa da razão de linhas de $[S\ II]/H\alpha$. No núcleo da galáxia é possível visualizar uma estrutura alongada na direção leste-oeste, com tamanho de cerca de $1,0''$ a partir do centro. Essa pequena região apresenta os menores valores encontrados para esta razão de linhas. Enquanto que, a partir de $1''$ do centro, são encontrados valores maiores para a razão, distribuídos ao longo da direção norte-sul. Semelhante ao mapa da razão de linhas de $[N\ II]/H\alpha$, os valores desta razão para o núcleo da galáxia podem estar afetados pela pior representação da contribuição das populações estelares para o contínuo sob a linha de $H\alpha$, descrito na seção 3.1. Visto que a linha de $H\alpha$ sofre muito mais as consequências deste erro quando comparado com as linhas de $[S\ II] \lambda\lambda 6716,6734$.

Na Figura 4.5 são apresentados os diagramas BPT para as razões de linhas de $[N\ II]/H\alpha$ e $[S\ II]/H\alpha$ versus $[O\ III]/H\beta$ no painel superior, e os mapas de excitação no painel inferior. No diagrama de diagnóstico de $[N\ II]/H\alpha$ versus $[O\ III]/H\beta$ a curva preta contínua separa objetos SF e objetos de transição proposta por Kauffmann et al. (2003), a curva preta pontilhada separa objetos de transição e AGNs proposta por Kewley et al. (2001) e a linha preta contínua proposta por Cid Fernandes et al. (2010) separa objetos Seyferts e LINERs. No diagrama BPT de $[S\ II]/H\alpha$ versus $[O\ III]/H\beta$, a curva preta pontilhada proposta por Kewley et al. (2001) separa objetos SF de AGNs e a linha preta proposta por Kewley et al. (2006) separa os objetos em Seyferts e LINERs. O mapa de excitação revela a posição de cada um dos *spaxels* sobre o diagrama BPT. A cor vermelha no diagrama BPT e no mapa de excitação indica que a emissão é do tipo Seyfert, a cor laranja indica que a emissão é do tipo LINER e a cor azul indica que a emissão é compatível com objetos de transição para o diagrama BPT – $[N\ II]/H\alpha$ e SF no diagrama BPT – $[S\ II]/H\alpha$.

Pode-se observar que o diagrama BPT para a razão de linhas $[N\ II]/H\alpha$ sugere que o mecanismo de excitação seja do tipo LINER por todo o campo de visão. Enquanto que a razão de linhas de $[S\ II]/H\alpha$ sugere que a região interna a um diâmetro de $1''$ seja ionizada por um AGN do tipo Seyfert, e a região externa é característica de emissão do tipo LINER. A região periférica dos mapas de excitação, no painel inferior da figura, parecem bastante afetados pelo ajuste superestimado da linha $H\beta$, como pode ser visualizado nos mapas de razão de linhas da Figura 4.4. Dessa forma, uma análise mais detalhada deverá ser feita posteriormente visto que

Figura 4.5 – Diagramas de diagnóstico BPT e mapas de excitação para a galáxia NGC 4546. Painel superior da esquerda: Diagrama BPT para a razão de linhas $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ versus $[\text{O III}]/\text{H}\beta$. Painel superior da direita: Diagrama BPT para a razão de linhas $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ versus $[\text{O III}]/\text{H}\beta$. Painel inferior da esquerda: Mapa de excitação do gás para o BPT $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ versus $[\text{O III}]/\text{H}\beta$. Painel inferior da direita: Mapa de excitação do gás para o BPT $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ versus $[\text{O III}]/\text{H}\beta$.



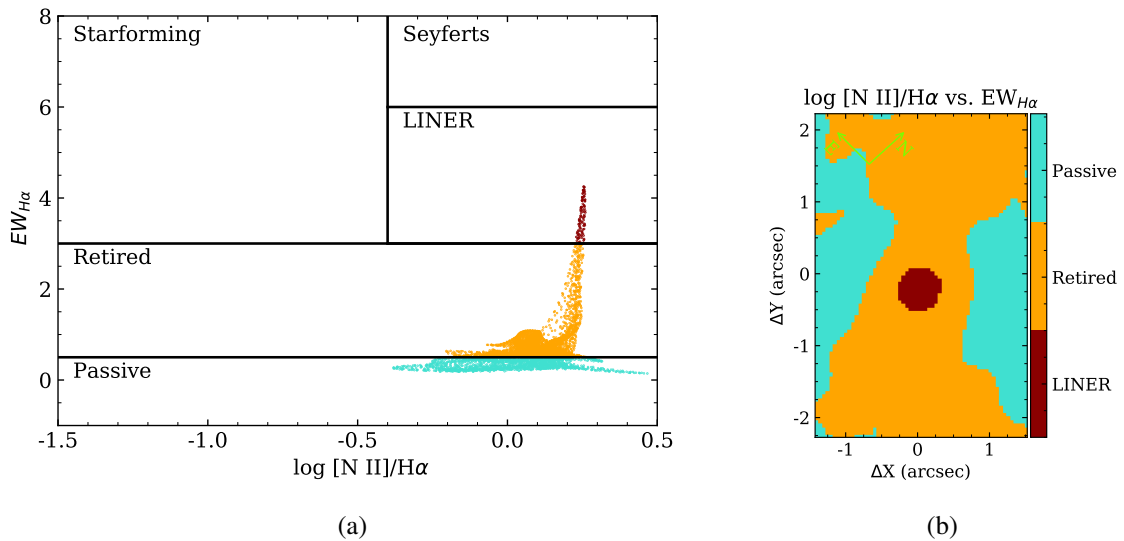
Fonte: A autora.

as razões de linhas são afetadas pelas medidas de $\text{H}\alpha$ e $\text{H}\beta$.

A Figura 4.6(a) apresenta o diagrama de diagnóstico WHAN para a galáxia NGC 4546. Os pontos em vermelho indicam emissão de tipo LINER, os pontos em laranja indicam ionização por HOLMES e os pontos em azul indicam emissão característica de galáxias que apresentam linhas de emissão muito fracas (galáxias passivas). A Figura 4.6(b) apresenta o mapa de excitação do gás que indica a posição de cada *spaxel* no diagrama de diagnóstico WHAN. O esquema de cores segue o mesmo da Figura 4.6(a).

O mapa de excitação da Figura 4.6(b) indica emissão nuclear do tipo LINER causada pelo AGN dentro de um raio de aproximadamente $0,25''$, e emissão distribuída ao longo da direção nordeste–sudeste, característica de ionização por HOLMES de acordo com o diagrama WHAN, praticamente perpendicular ao plano do disco estelar. Já a $\sim 0,8''$ a partir do núcleo, ao longo do eixo menor do disco de gás, o tipo de excitação indicado pelo diagrama corresponde ao mesmo de galáxias passivas, que possuem linhas de emissão muito fracas. A largura equivalente

Figura 4.6 – (a) Diagrama de diagnóstico WHAN para a razão de linha $[N II]/H\alpha$ versus $EW_{H\alpha}$. (b) Mapa de excitação do gás para o diagrama WHAN.



Fonte: A autora.

de $H\alpha$ é subestimada e afetada pelo problema na subtração da população estelar, porém estes valores estão de acordo com os valores obtidos por Ricci, Steiner e Menezes (2015). Na próxima seção (Seção 5) são discutidas as implicações na interpretação deste diagrama, uma vez que Ricci, Steiner e Menezes (2015) encontram um raio para o qual o gás da galáxia é ionizado pelo AGN de aproximadamente $0,84''$, implicando em regiões com $EW_{H\alpha} < 3 \text{ \AA}$.

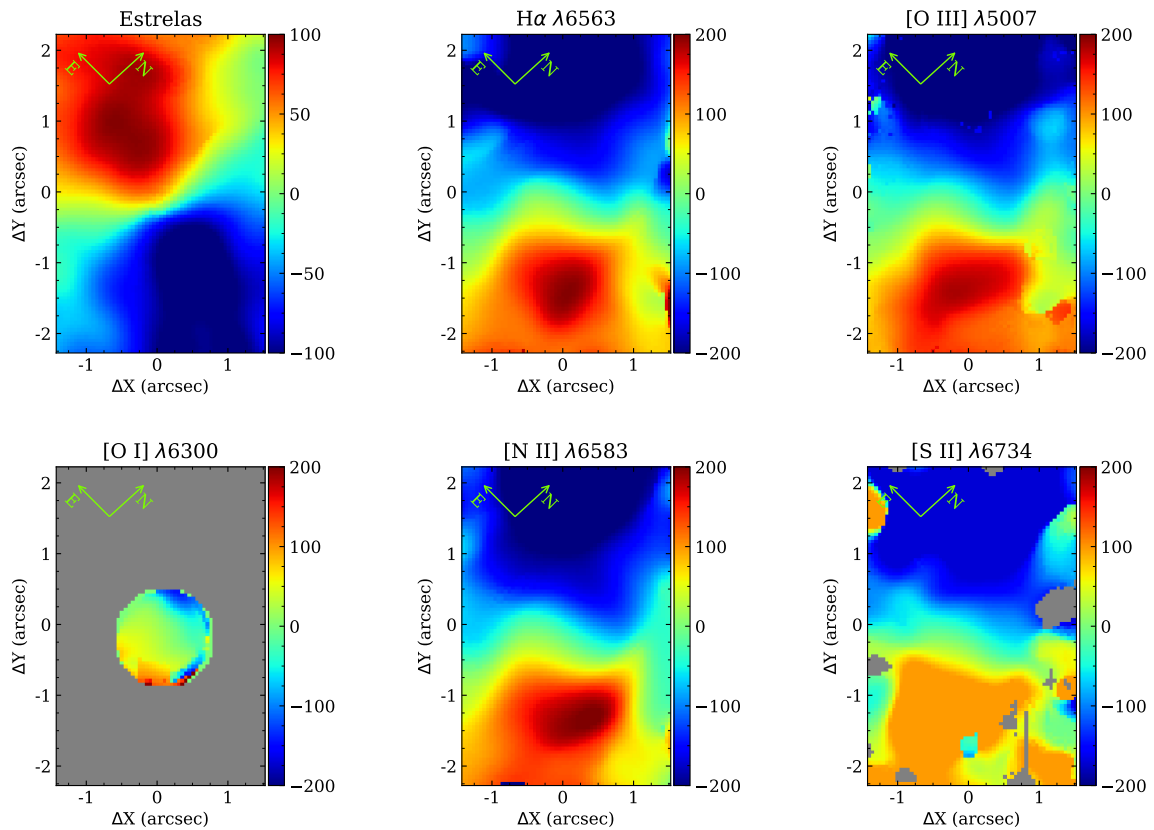
4.3 CAMPOS DE VELOCIDADES E MAPAS DE DISPERSÃO DE VELOCIDADES

Na Figura 4.7 são apresentados os mapas de velocidades para o gás e as estrelas, em km s^{-1} , corrigidos pela velocidade heliocêntrica de $-12,84 \text{ km s}^{-1}$. A orientação da linha dos nodos (Ψ_0) do campo de velocidades estelar (painel superior esquerdo da figura) está aproximadamente na direção leste-oeste, com $\Psi_0 \approx 72^\circ$, enquanto que o Ψ_0 para o campo de velocidades do gás está orientado a $\sim -134^\circ$, ambos em relação ao seu respectivo *redshift*. O campo de velocidades estelar apresenta um padrão de rotação bem comportado, com *blueshifts* equivalentes a -100 km s^{-1} observados a partir de $0,4''$ do núcleo, e *redshifts* equivalentes a 100 km s^{-1} observados a partir de $0,5''$ do núcleo.

Já o campo de velocidades do gás apresenta um padrão de rotação com perturbações próximas ao núcleo da galáxia. São encontradas velocidades da ordem de 200 km s^{-1} para todas as linhas de emissão, exceto para a linha de $[S II] \lambda 6734$, onde a amplitude de velocidade é da ordem de 100 km s^{-1} .

Do campo de dispersão de velocidades observado foi subtraído a dispersão causada pelo

Figura 4.7 – Mapas de velocidades de NGC 4546 em km s^{-1} .



Fonte: A autora.

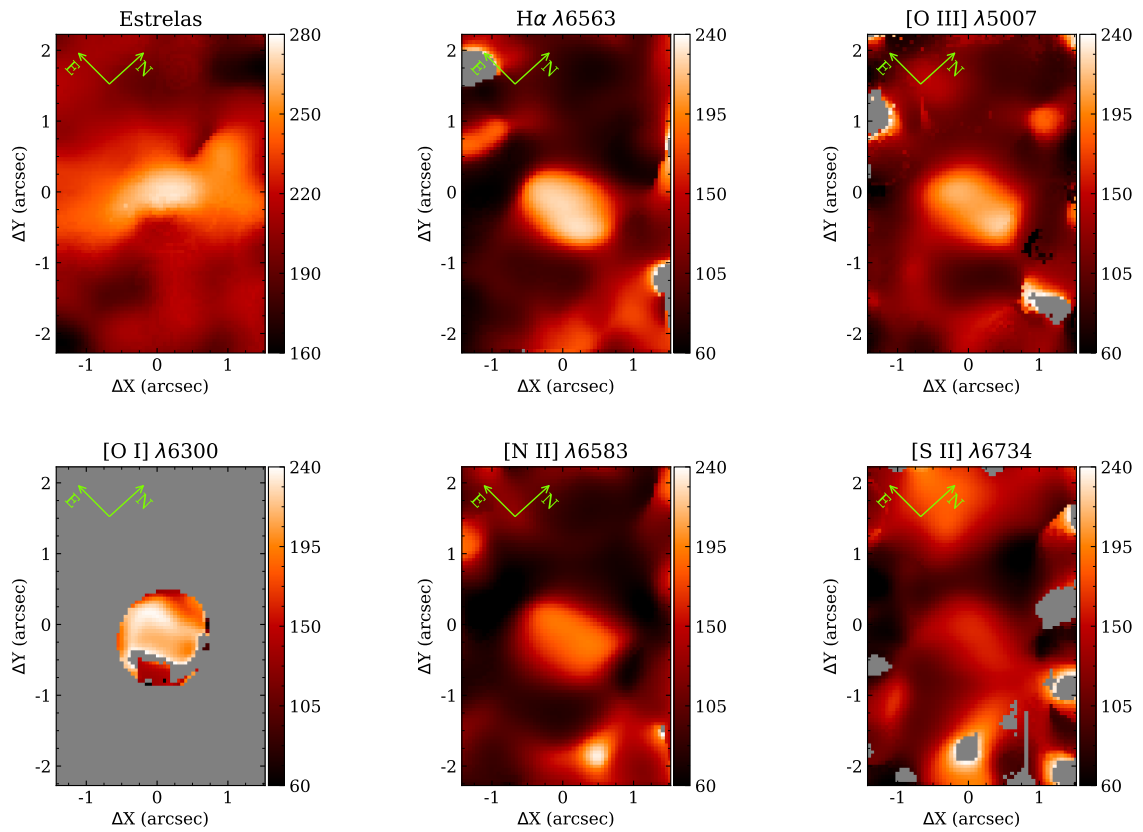
instrumento de observação². Dessa forma, obtêm-se o campo de dispersão de velocidades do objeto, apresentado na Figura 4.8. Os mapas bidimensionais de dispersão de velocidades para o gás revelam um pico de dispersão na região central. Esse pico se manifesta de forma assimétrica, estendido (cerca de $1,5''$) ao longo da direção leste-oeste, praticamente ao longo do disco estelar. Os valores de dispersão de velocidades se mantêm acima dos 100 km s^{-1} para todas as linhas de emissão. Entretanto, para as linhas de $\text{H}\alpha \lambda 6563$, $[\text{O III}] \lambda 5007$ e $[\text{O I}] \lambda 6300$ os valores de dispersão de velocidades ultrapassam os 200 km s^{-1} , enquanto que para as linhas $[\text{N II}] \lambda 6583$ e $[\text{S II}] \lambda 6734$ já são observados valores abaixo de 200 km s^{-1} nas mesmas regiões.

Uma leve diferença no padrão de dispersão pode ser observado entre a linha de $[\text{S II}] \lambda 6734$ e as demais linhas de emissão. O mesmo pico observado nas outras linhas aparece neste mapa também, mas a diferença é que os maiores valores de dispersão (aproximadamente 180 km s^{-1}) são encontrados a aproximadamente $1,5''$ a nordeste do núcleo da galáxia.

Já o mapa de dispersão de velocidades estelar, mostrado no painel superior esquerdo da Figura 4.8, apresenta um pico de dispersão de velocidades no centro do mapa, a $0,3''$ ao norte

²Para σ do gás: $\sigma^2 = \sigma_m^2 - \sigma_{inst}^2$, onde σ é a dispersão de velocidades do objeto, σ_m é a dispersão medida e σ_{inst} é a dispersão causada pelo instrumento. Para σ estelar: $\sigma^2 = \sigma_m^2 - \sigma_{inst}^2 + \sigma_{base}$, onde σ_{base} é a dispersão de velocidades da biblioteca MILES.

Figura 4.8 – Mapas de dispersão de velocidades de NGC 4546 em km s^{-1} .



Fonte: A autora.

do núcleo da galáxia. Esse pico se estende assimetricamente ao longo do eixo vertical da figura, perpendicular ao plano de rotação do disco estelar.

5 DISCUSSÕES

Os dados utilizados neste trabalho fazem parte de uma amostra maior de galáxias do tipo *early-type* que fazem parte do estudo realizado por Ricci, Steiner e Menezes (2014b), com o objetivo de estudar as propriedades da emissão do gás no núcleo e região circumnuclear das galáxias da amostra. Apesar dos dados utilizados neste trabalho e no trabalho de Ricci, Steiner e Menezes (2014a) serem os mesmos, adotamos metodologias diferentes. Dessa forma, nesta seção serão apresentadas as discussões a cerca dos resultados encontrados neste trabalho e comparar com os resultados encontrados na literatura.

Primeiramente, Ricci, Steiner e Menezes (2014a) utilizam o código STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2005) para realizar a subtração da componente estelar dos cubos de dados. Os autores utilizam a biblioteca de populações estelares de Walcher et al. (2009), criada a partir da biblioteca MILES (Vazdekis et al., 2010), que utiliza distribuições espectrais de energia de populações estelares simples. Enquanto que, neste trabalho, foi utilizada a técnica PPXF para a subtrair a contribuição estelar utilizando a biblioteca MILES completa de Sánchez-Blázquez et al. (2006). A principal diferença na metodologia da subtração da componente estelar consiste na utilização de diferentes bibliotecas estelares.

Modelos de populações estelares simples, como de Walcher et al. (2009), são interessantes quando se busca obter informações e caracterizar as populações estelares do objeto de estudo. Uma vez que, estes modelos são formados a partir de uma combinação de espectros observados e espectros teóricos, que levam em consideração ingredientes importantes de teorias de atmosferas estelares e de evolução estelar. Por outro lado, quando há interesse em somente obter um modelo que melhor descreve o espectro estelar da galáxia sem investigar as suas propriedades, um *template* formado por um conjunto de espectros estelares é mais conveniente. Isto porque são utilizados espectros reais de estrelas observadas e uma combinação de diversos tipos de estrelas resultam em um modelo que melhor descreve a componente estelar das galáxias.

Como neste trabalho não há interesse em investigar as propriedades das populações estelares da galáxia NGC 4546, utilizar espectros de estrelas para representar o modelo de uma galáxia se torna mais conveniente, e consegue descrever de forma adequada a componente estelar. Porém, neste trabalho, a componente estelar não foi muito bem reproduzida pelo *template* estelar na região vermelha do espectro nuclear da galáxia, onde se encontram as linhas de [N II] λ 6583 e $H\alpha$. Isto não está associado à escolha dos espectros utilizados na base, mas possivelmente ocorreu devido ao fato de ser incluído no ajuste regiões do espectro *contaminadas* por linhas de emissão, em particular de $H\alpha$ + [NII]. Apesar da má subtração do contínuo estelar (Fig. 3.1) na região nuclear, os mapas de cinemática e de fluxos de linhas de emissão do gás se mostram pouco afetados por este erro, visto que os mapas para [N II] λ 6583 e $H\alpha$ revelam as mesmas estruturas e o mesmo comportamento observado por Ricci, Steiner e Menezes (2015).

Uma diferença importante na interpretação dos mapas e que deve ser ressaltada, é que no trabalho de Ricci, Steiner e Menezes (2015), os autores observam a presença de uma componente larga em $H\alpha$ e realiza a sua subtração dos espectros, no intuito de investigar somente as propriedades da NLR da galáxia. Neste trabalho, esta componente não foi subtraída já que a contribuição da BLR é muito fraca e não afeta consideravelmente os resultados para as medidas das propriedades físicas da NLR.

Como mencionado, os mapas de fluxo e cinemática do gás ionizado revelam o mesmo comportamento em ambos os trabalhos. Pode-se observar que o fluxo das linhas de emissão de $[O III]\lambda 5007$, $[O I]\lambda 6300$ e $[S II]\lambda 6734$ obedecem o mesmo comportamento de $[N II]\lambda 6583$ e $H\alpha$, e exibem uma emissão estendida em praticamente todos os mapas, exceto para $[O I]\lambda 6300$.

5.1 EXCITAÇÃO DO GÁS

Os mapas de excitação correspondentes aos diagramas de diagnóstico BPT e WHAN, apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6, estão de acordo com o que é encontrado por Ricci, Steiner e Menezes (2014a). O mapa de excitação correspondente ao diagrama BPT para a razão de linhas $[N II]/H\alpha$ (Fig. 4.5) revela emissão LINER para a região nuclear e circumnuclear da galáxia, enquanto que o mapa de excitação que corresponde ao BPT para a razão $[S II]/H\alpha$ mostra emissão do tipo Seyfert para a região nuclear dentro de um raio de aproximadamente $0,5''$, e emissão LINER para a região externa.

No diagrama de diagnóstico WHAN (Fig. 4.6), a região interna ao raio de $0,25''$ revela que a fonte de ionização da região nuclear é do tipo LINER, enquanto que a partir do raio de $0,25''$, outro mecanismo pode ser o responsável pela ionização do gás. Ricci, Steiner e Menezes (2015) encontram uma largura equivalente de $H\alpha$ de até 6 \AA , com valores de $EW_{H\alpha} > 3 \text{ \AA}$ para um raio de até $0,5''$ a partir do núcleo, enquanto que neste trabalho, a maior $EW_{H\alpha}$ encontrada é de 4 \AA . Esta diferença entre os máximos de $EW_{H\alpha}$ pode ser atribuído ao problema na subtração do contínuo estelar na região nuclear da galáxia ou aos diferentes métodos utilizados.

Levando em consideração os resultados obtidos por Ricci, Steiner e Menezes (2015), o raio de ionização do AGN é maior que os valores dos mapas de excitação que este trabalho revelam. Utilizando modelos de fotoionização para reproduzir a luminosidade de $H\alpha$, Ricci, Steiner e Menezes (2015) encontram que o AGN é o responsável por ionizar o gás até um raio de $0,84''$ a partir do núcleo. Sendo assim, deve-se ter um cuidado quanto ao limite estipulado da $EW_{H\alpha}$ como consequência da ionização por AGN. Isso significa que, não necessariamente $EW_{H\alpha} < 3 \text{ \AA}$ implica em um mecanismo de ionização que não seja o AGN, uma vez que $EW_{H\alpha}$ menores são observadas dentro deste raio de $0,84''$ e os modelos de fotoionização indicam que a ionização do gás é predominantemente devida ao campo de radiação do AGN.

Os mapas de excitação apresentados neste trabalho, indicam a presença de emissão do tipo LINER em praticamente todo o campo de visão do GMOS. Mas os mecanismos de excita-

ção do gás são diferentes para a região do núcleo e a região externa. Na região nuclear até o raio de, pelo menos, $0,25''$ o mecanismo responsável pela excitação do gás é a atividade do buraco negro central. Já a região externa deve ser ionizada por outros mecanismos de excitação, como por exemplo choques ou estrelas post-AGB, como as HOLMES.

5.2 CINEMÁTICA DO GÁS

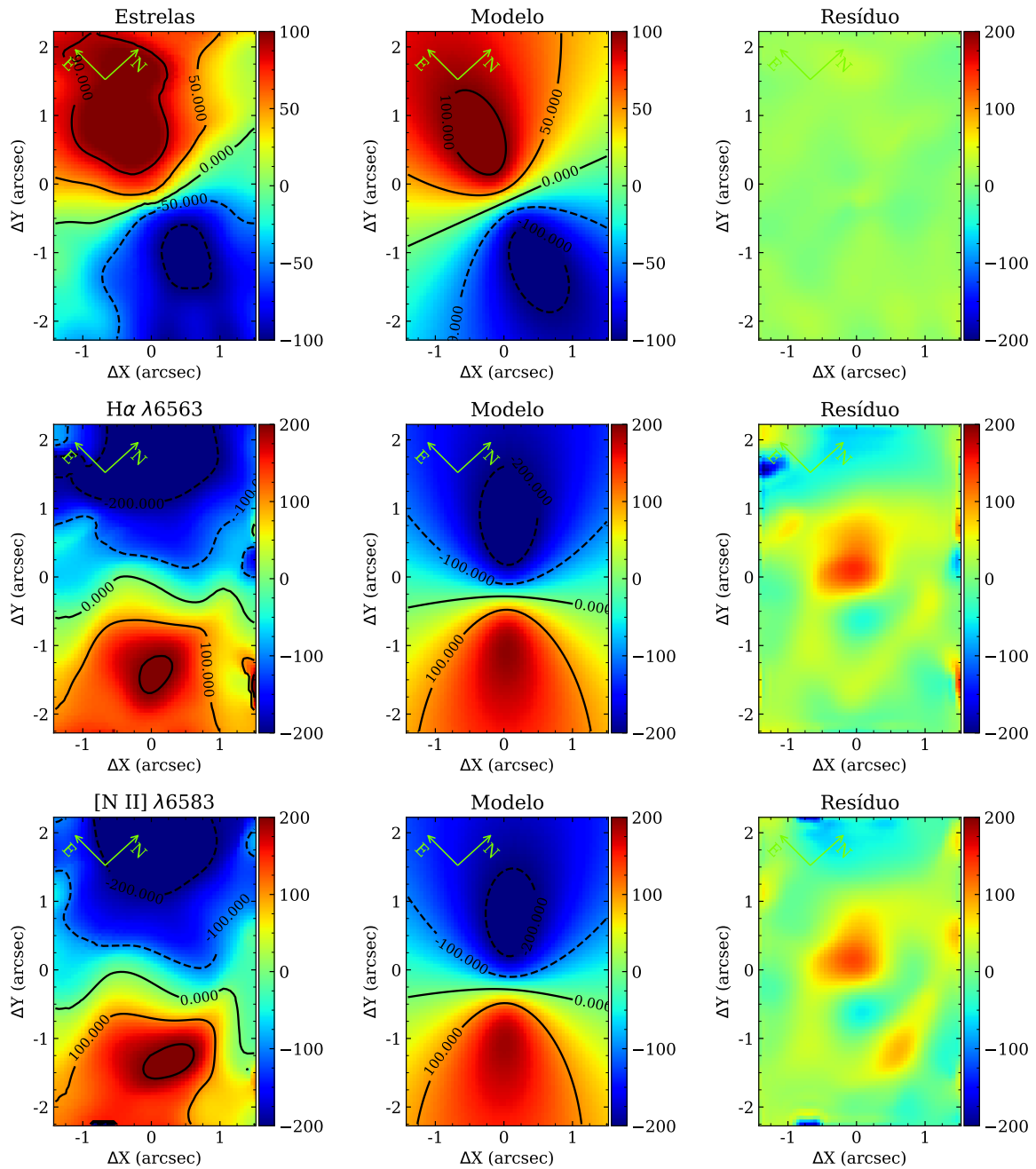
Os mapas de velocidade e dispersão de velocidades apresentados neste trabalho são compatíveis com os resultados encontrados por Ricci, Steiner e Menezes (2015), pois os mesmos comportamentos são observados em ambos os trabalhos. Porém, vale destacar que aqui ocorre uma análise sobre os mapas para cada linha em emissão separadamente. No caso dos mapas da cinemática de NGC 4546 de Ricci, Steiner e Menezes (2015), os autores apresentam mapas das linhas $[N II] \lambda\lambda 6548,6583$ e $H\alpha$, no qual foi realizado o ajuste com perfis gaussianos mantendo a dispersão de velocidades fixa para as três linhas de emissão. Sendo assim, pode-se observar que a amplitude de dispersão de velocidades de $[N II]+H\alpha$ encontrada por Ricci, Steiner e Menezes (2015) é razoavelmente menor (aproximadamente 50 km s^{-1}) que a encontrada para $H\alpha$ no nosso trabalho, por exemplo. Comparando os mapas de dispersão de velocidades da Figura 4.8, observa-se que a amplitude encontrada para o mapa de $H\alpha$ é maior do que o encontrado para $[N II] \lambda 6583$. Portanto, o valor mais baixo encontrado por Ricci, Steiner e Menezes (2015) pode estar associado ao ajuste das linhas de $[N II] \lambda 6583$ e $H\alpha$ que foram ajustadas em conjunto.

Com relação aos mapas de velocidade radial, não se observa uma diferença considerável na amplitude entre os trabalhos, como o encontrado nos mapas de dispersão. Como é possível visualizar na Figura 4.7, o mapa de velocidade do gás apresenta aproximadamente o dobro da amplitude de velocidade das estrelas. Este fenômeno pode ser causado pelo fato de o disco de gás ser fino, enquanto que o disco estelar é mais espesso, quando comparados um ao outro. Dessa forma, por efeitos de projeção, o gás aparentemente possui uma velocidade maior que as estrelas – a componente de velocidade ao longo da linha de visada para um disco fino (do gás) é maior do que para uma distribuição *mais oval*, visto para as estrelas.

No campo de velocidades do gás, a linha correspondente ao eixo de rotação (velocidade nula) não é bem comportada como no mapa de velocidades das estrelas. Esta linha apresenta distorções, um padrão observado para todas as linhas de emissão. O campo de velocidades é dominado por rotação, mas as distorções no centro da galáxia certamente são originadas por perturbações causadas por efeitos não-Keplerianos, como é observado e destacado por Ricci, Steiner e Menezes (2015) e Sarzi et al. (2006).

Para investigar a causa destas distorções nos mapas de velocidade radial, ajustamos o campo de velocidades das linhas de emissão de $[O III] \lambda 5007$, $[N II] \lambda 6583$, $H\alpha$ e das estrelas utilizando o modelo analítico proposto por Bertola et al. (1991) e descrito na seção 3.3. As Fi-

Figura 5.1 – Painel esquerdo apresenta o mapa de velocidade radial observado, o painel central apresenta o modelo de rotação ajustado e o painel direito apresenta o mapa de resíduo para as estrelas e para as linhas de emissão de $H\alpha$ e $[N II] \lambda 6583$, respectivamente.

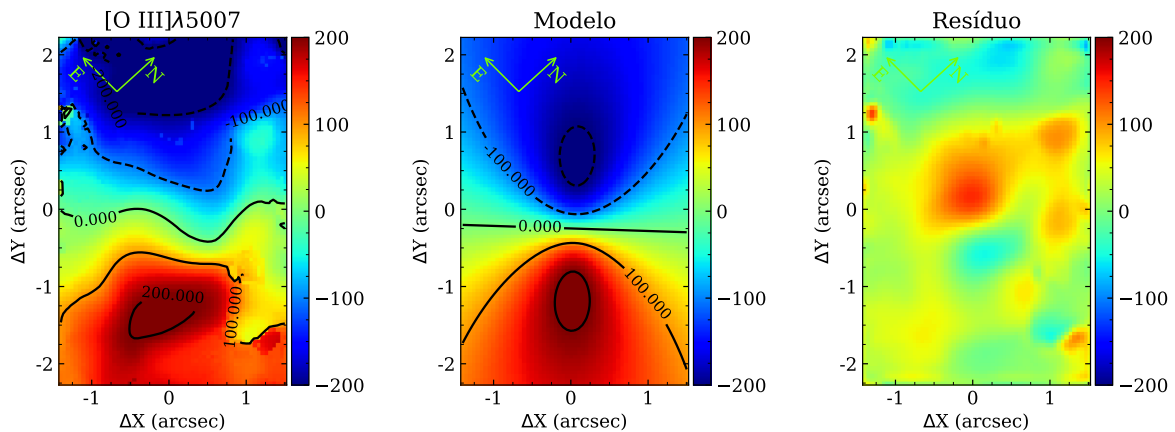


Fonte: A autora.

Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os mapas de velocidades observados no painel esquerdo, os modelos ajustados no painel central e os mapas de resíduos no painel direito, para as estrelas e as linhas de emissão de $H\alpha$, $[N II] \lambda 6583$ e $[O III] \lambda 5007$, respectivamente. O mapa de resíduos é obtido a partir da subtração entre o mapa de velocidades observado e o modelo cinemático ajustado.

O ajuste do modelo cinemático das estrelas foi realizado com todos os parâmetros li-

Figura 5.2 – O mesmo da Figura 5.1 para a linha de emissão [O III] $\lambda 5007$.



vres, e podemos ver na Figura 5.1 que o mapa resultante descreve muito bem as velocidades observadas, uma vez que o mapa de resíduos apresenta valores de velocidades menores ou igual a 20 km s^{-1} em todas as regiões. Estas pequenas perturbações observadas no mapa de resíduos podem ser resultado da interação entre os objetos do disco e a barra, visto que estas estruturas em *redshift* e *blueshift* são observadas quase que paralelamente à barra, cujo PA é igual a 33° .

Já para o modelo de rotação do gás, a inclinação do disco e o centro de rotação foram fixados aos valores obtidos a partir do modelo cinemático das estrelas. A orientação da linha dos nodos (Ψ_0), a velocidade sistêmica (v_{sis}) e a amplitude de velocidades são os parâmetros livres do ajuste da cinemática do gás. De certa forma, os modelos cinemáticos ajustados aos campos de velocidade do gás reproduziram satisfatoriamente os comportamentos observados, sugerindo que o disco de gás é dominado pelo potencial gravitacional da galáxia. Porém, os mapas de resíduos revelam estruturas em *redshift* com amplitudes de velocidades em torno de 100 km s^{-1} para as linhas de emissão de $H\alpha$, [N II] $\lambda 6583$ e [O III] $\lambda 5007$, e pequenas estruturas em *blueshift* com velocidades menores que 100 km s^{-1} . Estes resíduos observados podem ser interpretados como *outflows* bicônicos de gás na NLR, com *redshifts* para nordeste e *blueshifts* para sudoeste do núcleo. Uma possível interpretação para os *outflows* é que eles sejam originados a partir dos ventos emanados do disco de acreção do SMBH, que interagem com o gás ambiente da galáxia. As orientações das linhas dos nodos e as amplitudes de velocidades de todos os modelos são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros obtidos a partir do ajuste do modelo cinemático ao campo de velocidades das estrelas e dos gás de NGC 4546.

	Ψ_0	$A \text{ (km s}^{-1}\text{)}$
Estrelas	$72,3^\circ \pm 0,1^\circ$	$294,8 \pm 1,3$
$H\alpha$	$-132,9^\circ \pm 0,3^\circ$	$545,4 \pm 2,3$
[N II] $\lambda 6583$	$-135,0^\circ \pm 0,3^\circ$	$530,6 \pm 2,2$
[O III] $\lambda 5007$	$-133,9^\circ \pm 0,3^\circ$	$541,8 \pm 2,3$

Dessa forma, no intuito de investigar a influência do *outflow* sobre a região central da galáxia NGC 4546, buscamos estimar a taxa de *outflow* de matéria analisando o mapa de resíduos para o H α e utilizando a equação dada por Riffel, Storchi-Bergmann e Winge (2013):

$$\dot{M}_{out} = \frac{2m_p \eta_e v_{obs} f A}{\sin \theta}, \quad (5.1)$$

onde m_p é a massa do próton, η_e é a densidade eletrônica, v_{obs} é a velocidade observada do *outflow*, f é o *filling factor*, A é a área, θ é o ângulo de inclinação do eixo do cone em relação ao plano do céu e o fator 2 é incluído para considerar os dois lados do bicone. Realizamos a estimativa de \dot{M}_{out} para uma seção transversal localizada a $0,5''$ do núcleo. Foi obtida uma velocidade média $v_{obs} = 120 \text{ km s}^{-1}$, a partir do mapa de resíduos da linha de emissão de H α , para uma área de $A \approx 1,27 \times 10^{40} \text{ cm}^2$ com raio de $0,25'' \approx 21 \text{ pc}$. Assumiu-se o valor típico de *filling factor* encontrado na literatura, com $f = 0,01$ (Riffel; Storchi-Bergmann; Winge, 2013), e um ângulo de inclinação $\theta = 45^\circ$ com o plano do céu (o qual é altamente incerto, uma vez que não é possível determiná-lo diretamente de nossos dados).

A densidade eletrônica foi estimada através da razão das intensidades das linhas de emissão I([S II] $\lambda 6716$)/ I([S II] $\lambda 6730$) considerando uma temperatura eletrônica (T_e) de 10.000 K, e utilizando a equação proposta por Proxauf, Öttl e Kimeswenger (2014). Os fluxos das linhas do [S II] foram medidos a partir do espectro integrado da galáxia e o valor de densidade estimado a partir destes fluxos pode ser considerado um valor *típico* para a região central de NGC 4546. Utilizando estas suposições, obtém-se um valor médio de $\eta_e = 600 \text{ cm}^{-3}$, típico de regiões que possuem um AGN. Portanto, a taxa de *outflow* encontrada foi de $\dot{M}_{out} \approx 0,048/\sin \theta \text{ M}_\odot \text{ yr}^{-1}$ para um θ qualquer e, considerando $\theta = 45^\circ$, encontra-se $\dot{M}_{out} \approx 0,068 \text{ M}_\odot \text{ yr}^{-1}$. A incerteza desta medida é alta (pelo menos uma ordem de grandeza), devido as suposições feitas a cerca da geometria do *outflow*, *filling factor* e densidade do gás.

A partir da estimativa da taxa de *outflow*, é possível obter a sua potência cinética (\dot{E}_{cin}) através da equação dada por Storchi-Bergmann et al. (2010):

$$\dot{E}_{cin} = \frac{\dot{M}_{out}}{2} (v_{out}^2 + \sigma^2), \quad (5.2)$$

onde $v_{out} = v_{obs}/\sin \theta$ e σ é a dispersão de velocidades média de H α na região do *outflow*. Assumindo que o eixo do bicone de ionização possui um ângulo de inclinação $\theta = 45^\circ$ com o plano do céu, e uma dispersão de velocidades média $\sigma = 155 \text{ km s}^{-1}$ obtida a partir do mapa da Figura 4.8, foi encontrado uma potência cinética de $\dot{E}_{cin} = 1,12 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$.

Ricci, Steiner e Menezes (2014a) encontram uma luminosidade bolométrica do AGN de NGC 4546 de $L_{bol} \approx 8,71 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$, obtida a partir da relação de luminosidades $L_{bol}/L_{[OIII]} \sim 584$. Comparando a potência cinética do *outflow* encontrada com a L_{bol} obtida por Ricci, Steiner e Menezes (2014a), encontramos que a razão \dot{E}_{cin}/L_{bol} é da ordem de $1,28 \times 10^{-4}$. Utilizando modelos e simulações, é possível estipular um limite para o qual a eficiência do *feedback* do AGN é importante sobre a formação estelar nas galáxias hospedeiras

(Hopkins; Elvis, 2010). Dessa forma, estes estudos revelam que se a potência cinética do *outflow* é menor que 5% da luminosidade bolométrica, então estes *outflows* não possuem potência suficiente para alcançar escalas de kpc e afetar a formação estelar da galáxia. Este é o caso dos *outflows* em NGC 4546, os quais não são potentes o suficiente para afetar a evolução da galáxia. Estes *outflows* somente podem ser eficientes em transferir o gás em escalas de dezenas de parsecs. Ou seja, o modo de *feedback* atuando em NGC 4546 é o modo de manutenção, onde o gás é redistribuído na região central da galáxia, mas permanece disponível para futura formação estelar.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, realizamos um estudo detalhado sobre a cinemática do gás ionizado da região central da galáxia NGC 4546, hospedeira de um AGN de baixa luminosidade, em busca de assinaturas de *feedback* do AGN, a fim de investigar sua influência sobre a galáxia hospedeira. Apesar de utilizarmos neste trabalho uma metodologia diferente da utilizada por Ricci, Steiner e Menezes (2014a), encontramos resultados semelhantes aos destes autores no que compete as observações das distribuições de fluxos e cinemática do gás e das estrelas. Isto indica que há uma coerência quanto à análise dos resultados e, apesar dos erros envolvidos nesta análise, os processos envolvidos deram conta de reproduzir satisfatoriamente os resultados esperados. Embora os mapas apresentados neste trabalho sejam parecidos aos já publicados anteriormente, aqui apresenta-se uma análise mais aprofundada da cinemática do gás. Os principais resultados deste trabalho são:

- ★ Observa-se emissão estendida em todo o campo do GMOS para as principais linhas de emissão do ótico e razões de linhas indicam que a emissão nuclear da galáxia é devida a excitação do gás por um núcleo ativo do tipo LINER;
- ★ A cinemática do gás e das estrelas é dominada por rotação, com o gás e as estrelas orbitando o núcleo em sentidos contrários. Além do padrão de rotação, a cinemática do gás revela movimentos não circulares que não podem ser explicados por movimentos de gás devido ao potencial gravitacional da galáxia;
- ★ Na busca por assinaturas de *outflows*, foi ajustado o modelo cinemático proposto por Bertola et al. (1991), aos campos de velocidade do gás e analisados os resíduos do modelo, dado pelo campo de velocidades observado menos o campo de velocidades previsto pelo modelo. Encontramos resíduos em *redshifts* com velocidades de $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$, que se estendem até distâncias de $0,5''$ para nordeste do núcleo. A sudoeste do núcleo, resíduos semelhantes são observados em *blueshifts*. Estas estruturas vistas no mapa de resíduos são interpretadas como sendo devidas a um *outflow* em formato bicônico, orientado aproximadamente ao longo da direção nordeste–sudoeste;
- ★ Utilizando as velocidades e geometria observadas para o *outflow* e fazendo suposições a cerca da densidade e distribuição do gás, estimamos uma taxa de *outflow* de gás ionizado de $\sim 0,068 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, a qual é comparável aos valores obtidos para outros AGN de baixa luminosidade;
- ★ A partir de \dot{M}_{out} , estimamos a potência cinética do *outflow* de gás ionizado, e encontramos um valor de $1,12 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, que corresponde a somente 0,013 % luminosidade bolométrica do núcleo da galáxia do AGN de NGC 4546;

- ★ O valor estimado para a potência cinética do *outflow* em NGC 4546 implica que este não é suficientemente potente para influenciar a evolução da galáxia em grande escala, suprimindo a formação estelar. Este tipo de *feedback* é chamado de *maintenance mode*, no qual os *outflows* não possuem velocidades suficientes para escapar dos limites da galáxia. Sendo assim, os ventos gerados pelo disco de acreção empurram o gás da NLR para escalas da ordem de poucos kpc, e podem regular a formação estelar somente nestas regiões mais internas.

O método adotado para a subtração da contribuição da população estelar para o espectro contínuo e de absorção não se mostrou eficiente para as posições próximas ao núcleo da galáxia. Dessa forma, como uma perspectiva deste trabalho, pretende-se refazer os ajustes do espectro contínuo e dos perfis das linhas de emissão, a fim de se obter medidas robustas de fluxos das linhas de emissão em todas as localizações do campo observado. Também é necessário estender o estudo para outros AGNs de baixa luminosidade de forma a obter um melhor entendimento da importância do *feedback* de AGN neste regime de luminosidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allington-Smith, J. et al. Integral Field Spectroscopy with the Gemini Multiobject Spectrograph. I. Design, Construction, and Testing. , v. 114, n. 798, p. 892–912, Aug 2002.
- Antonucci, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. , v. 31, p. 473–521, 1993.
- Antonucci, R. R. J.; Miller, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. , v. 297, p. 621–632, out. 1985.
- Baldwin, J. A.; Phillips, M. M.; Terlevich, R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. , v. 93, p. 5–19, Feb 1981.
- Barbosa, F. K. B. et al. Gemini/GMOS IFU gas velocity ‘tomography’ of the narrow line region of nearby active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 396, n. 1, p. 2–18, 06 2009.
- Bertola, F. et al. Testing the Gravitational Field in Elliptical Galaxies: NGC 5077. , v. 373, p. 369, Jun 1991.
- Bettoni, D.; Galletta, G.; Oosterloo, T. Stellar and gas kinematics of NGC 4546, the double-spin SBO. , v. 248, p. 544–554, fev. 1991.
- Binette, L. et al. Photoionization in elliptical galaxies by old stars. , v. 292, p. 13–19, Dec 1994.
- Bönsch, G.; Potulski, E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén’s formulae. **Metrologia**, v. 35, p. 133, Jan 1998.
- Cappellari, M.; Emsellem, E. Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood. , v. 116, n. 816, p. 138–147, Feb 2004.
- Carroll, B.; Ostlie, D. **An Introduction to Modern Astrophysics**. [S.l.]: Pearson Addison-Wesley, 2007.
- Cenarro, A. J. et al. Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra - II. The stellar atmospheric parameters. , v. 374, n. 2, p. 664–690, Jan 2007.
- Cid Fernandes, R. et al. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. , v. 358, n. 2, p. 363–378, Apr 2005.
- _____. A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN? , v. 413, n. 3, p. 1687–1699, May 2011.
- _____. Alternative diagnostic diagrams and the “forgotten” population of weak line galaxies in the sdss. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 403, n. 2, p. 1036–1053, Feb 2010.
- Combes, F. Models of AGN feedback. In: Ziegler, B. L. et al. (Ed.). **Galaxies in 3D across the Universe**. [S.l.: s.n.], 2015. (IAU Symposium, v. 309), p. 182–189.
- de Vaucouleurs, G. H.; de Vaucouleurs, A.; Shapley, H. **Reference catalogue of bright galaxies**. [S.l.: s.n.], 1964.

- Fabian, A. Observational evidence of active galactic nuclei feedback. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 50, n. 1, p. 455–489, 2012.
- Falcón-Barroso, J. et al. An updated MILES stellar library and stellar population models. , v. 532, p. A95, Aug 2011.
- Ferland, G. J.; Netzer, H. Are there any shock-heated galaxies ? , v. 264, p. 105–113, Jan 1983.
- Ferrarese, L.; Merritt, D. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. , v. 539, p. L9–L12, ago. 2000.
- Filippenko, A. V. The importance of atmospheric differential refraction in spectrophotometry. , v. 94, p. 715–721, Aug 1982.
- Fischer, T. C. et al. Determining inclinations of active galactic nuclei via their narrow-line region kinematics. ii. correlation with observed properties. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 785, n. 1, p. 25, Mar 2014.
- Galletta, G. Detection of retrograde gas streaming in the SB0 galaxy NGC 4546. , v. 318, p. 531–535, jul. 1987.
- García-Burillo, S.; Combes, F. The feeding of activity in galaxies: a molecular line perspective. In: **Journal of Physics Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2012. (Journal of Physics Conference Series, v. 372).
- Gil de Paz, A. et al. The GALEX Ultraviolet Atlas of Nearby Galaxies. , v. 173, n. 2, p. 185–255, Dec 2007.
- Gonzalez, R.; Woods, R. **Digital Image Processing**. 2nd ed. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2002.
- Halpern, J. P.; Steiner, J. E. Low ionization active galactic nuclei : X-ray or shock heated ? , v. 269, p. L37–L41, Jun 1983.
- Harrison, C. M. The impact of agn on their host galaxies. **Proceedings of the International Astronomical Union**, Cambridge University Press (CUP), v. 9, n. S304, p. 284–290, Oct 2013.
- Heckman, T. M. An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei. , v. 87, p. 152–164, jul. 1980.
- Heckman, T. M. et al. Absorption-Line Probes of Gas and Dust in Galactic Superwinds. , v. 129, n. 2, p. 493–516, Aug 2000.
- Ho, L. C. Nuclear activity in nearby galaxies. , v. 46, p. 475–539, Sep 2008.
- Ho, L. C.; Filippenko, A. V.; Sargent, W. L. W. A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies. , v. 112, n. 2, p. 315–390, Oct 1997.
- Hopkins, P. F.; Elvis, M. Quasar feedback: more bang for your buck. , v. 401, n. 1, p. 7–14, Jan 2010.
- Hubble, E. P. **Realm of the Nebulae**. [S.l.: s.n.], 1936.
- Kauffmann, G. et al. The host galaxies of active galactic nuclei. , v. 346, n. 4, p. 1055–1077, Dec 2003.

Kewley, L. J. et al. The host galaxies and classification of active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 372, n. 3, p. 961–976, Nov 2006.

_____. Optical Classification of Southern Warm Infrared Galaxies. , v. 132, n. 1, p. 37–71, Jan 2001.

Lucy, L. B. An iterative technique for the rectification of observed distributions. , v. 79, p. 745, Jun 1974.

Magorrian, J. et al. The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers. , v. 115, n. 6, p. 2285–2305, Jun 1998.

Markwardt, C. B. **Non-linear Least-squares Fitting in IDL with MPFIT**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 411. 251 p.

Menezes, R. B. **Espectroscopia 3D de núcleos ativos de galáxias: tratamento e análise de dados no óptico e infravermelho próximo**. 2012. Tese (Doutorado em Astronomia) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Mo, H.; van den Bosch, F. C.; White, S. **Galaxy Formation and Evolution**. [S.l.: s.n.], 2010.

Nyland, K. et al. The ATLAS^{3D} Project - XXXI. Nuclear radio emission in nearby early-type galaxies. , v. 458, n. 2, p. 2221–2268, May 2016.

Osterbrock, D. E.; Ferland, G. J. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**. [S.l.: s.n.], 2006.

Pogge, R. W. et al. The narrow-line regions of liners as resolved with thehubble space telescope. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 532, n. 1, p. 323–339, Mar 2000.

Pradhan, A. K.; Nahar, S. N. **Atomic Astrophysics and Spectroscopy**. [S.l.: s.n.], 2011.

Proxauf, B.; Öttl, S.; Kimeswenger, S. Upgrading electron temperature and electron density diagnostic diagrams of forbidden line emission. , v. 561, p. A10, Jan 2014.

Ricci, T. V. **Análise da emissão nuclear e circumnuclear de gás de uma amostra de 10 galáxias elípticas e lenticulares**. 2013. Tese (Doutorado em Astronomia) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Ricci, T. V.; Steiner, J. E.; Menezes, R. B. IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - II. Nuclear emission line properties. , v. 440, p. 2442–2456, maio 2014.

_____. Integral field unit spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - I. Principal component analysis Tomography and nuclear activity. , v. 440, p. 2419–2441, maio 2014.

_____. IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - III. Properties of the circumnuclear gas emission. , v. 451, p. 3728–3758, ago. 2015.

Richardson, W. H. Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration. **Journal of the Optical Society of America (1917-1983)**, v. 62, n. 1, p. 55, Jan 1972.

Riffel, R. A. profit: a new alternative for emission-line profile fitting. , v. 327, p. 239–244, jun. 2010.

Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R. An outflow perpendicular to the radio jet in the Seyfert nucleus of NGC 5929. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 780, n. 2, p. L24, 2013.

Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Winge, C. Feeding versus feedback in agns from near-infrared ifu observations: the case of mrk 79. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 430, n. 3, p. 2249–2261, Feb 2013.

Sage, L. J.; Galletta, G. Counter-rotating molecular gas in NGC 4546. , v. 108, p. 1633–1637, nov. 1994.

Sánchez-Blázquez, P. et al. Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra. , v. 371, n. 2, p. 703–718, Sep 2006.

Sandage, A. **The Hubble Atlas of Galaxies**. [S.l.: s.n.], 1961.

Sarzi, M. et al. The SAURON project—V. Integral-field emission-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 366, n. 4, p. 1151–1200, 2006.

_____. The SAURON project – XVI. On the sources of ionization for the gas in elliptical and lenticular galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 402, n. 4, p. 2187–2210, 2010.

Schmitt, H. R.; Storchi-Bergmann, T.; Baldwin, J. A. Anisotropic High-Excitation Emission and Chemical Abundances in the Seyfert 2 Galaxy NGC 5643. , v. 423, p. 237, Mar 1994.

Schneider, P. **Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction**. [S.l.]: Springer, 2006.

Silk, J.; Mamon, G. A. The current status of galaxy formation. **Research in Astronomy and Astrophysics**, v. 12, n. 8, p. 917–946, Aug 2012.

Stasińska, G. et al. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - III. How to distinguish AGN hosts. , v. 371, n. 2, p. 972–982, Sep 2006.

_____. Can retired galaxies mimic active galaxies? Clues from the Sloan Digital Sky Survey. , v. 391, n. 1, p. L29–L33, Nov 2008.

Steiner, J. E. et al. PCA Tomography: how to extract information from data cubes*. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 395, n. 1, p. 64–75, 04 2009.

Storchi-Bergmann, T. Feeding and feedback in nearby agn – comparison with the milky way center. **Proceedings of the International Astronomical Union**, Cambridge University Press (CUP), v. 9, n. S303, p. 354–363, Oct 2013.

Storchi-Bergmann, T. et al. Feeding versus feedback in NGC 4151 probed with Gemini NIFS – II. Kinematics. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 402, n. 2, p. 819–835, 02 2010.

Storchi-Bergmann, T.; Schnorr-Müller, A. Observational constraints on the feeding of super-massive black holes. **Nature Astronomy**, Nature Publishing Group, v. 3, n. 1, p. 48–61, Jan 2019.

Urry, C. M.; Padovani, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. , v. 107, p. 803, set. 1995.

van der Kruit, P. C.; Allen, R. J. The kinematics of spiral and irregular galaxies. , v. 16, p. 103–139, Jan 1978.

van Dokkum, P. G. Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection. , v. 113, n. 789, p. 1420–1427, Nov 2001.

Vazdekis, A. et al. Evolutionary stellar population synthesis with MILES - I. The base models and a new line index system. , v. 404, n. 4, p. 1639–1671, Jun 2010.

Veilleux, S.; Osterbrock, D. E. Spectral classification of emission-line galaxies. , v. 63, p. 295–310, fev. 1987.

Walcher, C. J. et al. Differential stellar population models: how to reliably measure $[\text{Fe}/\text{H}]$ and $[\alpha/\text{Fe}]$ in galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 398, n. 1, p. L44–L48, 09 2009.