

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

Johan Matheus Marques

**A CINEMÁTICA E DISTRIBUIÇÃO DO GÁS MOLECULAR E IONIZADO  
NA REGIÃO CENTRAL DA GALÁXIA SEYFERT NGC 1125**

Santa Maria, RS  
2021

**Johan Matheus Marques**

**A CINEMÁTICA E DISTRIBUIÇÃO DO GÁS MOLECULAR E IONIZADO NA REGIÃO  
CENTRAL DA GALÁXIA SEYFERT NGC 1125**

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**.

ORIENTADOR: Dr. Rogemar A. Riffel

COORIENTADOR: Dr. Marlon R. Diniz

Santa Maria, RS  
2021

Marques, Johan Matheus

A cinemática e distribuição do gás molecular e ionizado na região central da galáxia Seyfert NGC 1125 / Johan Matheus Marques.- 2021.

63 p.; 30 cm

Orientador: Rogemar André Riffel

Coorientador: Marlon Rodrigo Diniz

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, RS, 2021

1. Núcleos Ativos de Galáxias 2. Galáxias 3. Evolução de galáxias I. Riffel, Rogemar André II. Diniz, Marlon Rodrigo III. Título.

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.

Declaro, JOHAN MATHEUS MARQUES, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Johan Matheus Marques**

**A CINEMÁTICA E DISTRIBUIÇÃO DO GÁS MOLECULAR E IONIZADO NA REGIÃO  
CENTRAL DA GALÁXIA SEYFERT NGC 1125**

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 18 de agosto de 2021:**

---

**Rogemar A. Riffel, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Sandro Barboza Rembold, Dr. (UFSM)**

---

**Miriani G. Pastoriza, Dra. (UFRGS)**

Santa Maria, RS  
2021

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Tânia e Danilo, que sempre estiveram ao meu lado, seja batalhando nas sessenta e quatro casas do xadrez ou estudando as incontáveis galáxias do Universo.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Aos meus pais, Tânia e Danilo, por toda a dedicação em todos esses anos para que eu pudesse completar mais uma fase da minha vida.*

*Ao meu orientador, Prof. Rogemar Riffel. Sem ele este trabalho não seria possível. Sou imensamente grato pela paciência e compreensão durante todo esse tempo que trabalhamos juntos.*

*Agradeço aos meus amigos, colegas e ex-colegas de laboratório.*

*Ao CNPq pelo apoio financeiro.*

## RESUMO

### A CINEMÁTICA E DISTRIBUIÇÃO DO GÁS MOLECULAR E IONIZADO NA REGIÃO CENTRAL DA GALÁXIA SEYFERT NGC 1125

AUTOR: Johan Matheus Marques

ORIENTADOR: Rogemar A. Riffel

COORIENTADOR: Marlon R. Diniz

Utilizamos observações espectroscópicas nas bandas J e K dos 350 pc centrais da galáxia NGC 1125 para investigar a estrutura e cinemática do gás molecular quente ( $\sim 2000$  K) e ionizado, bem como das estrelas. Os dados espectroscópicos foram obtidos com o Telescópio Gemini Norte, utilizando o instrumento NIFS, que possui uma resolução espacial de cerca de 80 pc e resolução espectral de aproximadamente  $50 \text{ km s}^{-1}$ . A cinemática estelar foi obtida a partir dos ajustes das bandas de absorção do CO em  $\sim 2.3 \mu\text{m}$  e o campo de velocidades estelar apresenta um padrão de rotação que é bem reproduzido por um modelo de disco em rotação. A cinemática e a excitação do gás foram estudadas a partir do ajuste das linhas de emissão do [Fe II], [P II], H<sub>2</sub> e de recombinação do hidrogênio a partir de séries de Gauss-Hermite e funções gaussianas. As linhas de emissão do H<sub>2</sub> e [Fe II] são produzidas possivelmente pela excitação do gás por choques e pela radiação do núcleo ativo (do tipo Seyfert 2). O campo de velocidades do gás molecular é dominado por uma componente de rotação no plano da galáxia, semelhante à observada para as estrelas, enquanto que o gás ionizado apresenta também uma componente devida a um *outflow* bipolar, com velocidade de  $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ . Esse *outflow* interage com o gás do disco, produzindo também um *outflow* de gás molecular quente, visto somente no núcleo da galáxia. As massas de gás molecular quente e ionizado no *outflow* são  $45 M_{\odot}$  e  $4.3 \times 10^4 M_{\odot}$ , respectivamente. Esses valores correspondem a cerca de 32% de todo o gás ionizado e 15% do gás molecular quente presente na região central da galáxia. Assumindo uma geometria bicônica, determinamos uma taxa de *outflow* de gás ionizado de  $\dot{M}_{\text{out}} \approx 6.0 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{ano}$  e uma potência cinética do *outflow* de  $\dot{E}_{\text{kin}} \approx 4.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ , indicando que os *outflows* observados em NGC 1125 não são potentes o suficiente para afetar a formação estelar da galáxia hospedeira, mas podem ser eficientes em redistribuir o gás na região central da galáxia.

**Palavras-chave:** Núcleos Ativos de Galáxias. Galáxias. Evolução de Galáxias.

## ABSTRACT

### THE KINEMATICS AND DISTRIBUTION OF THE MOLECULAR AND IONIZED GAS IN THE CENTRAL REGION OF THE SEYFERT GALAXY NGC 1125

AUTHOR: Johan Matheus Marques  
ADVISOR: Rogemar A. Riffel  
CO-ADVISOR: Marlon R. Diniz

We use the J and K spectroscopic observations of the inner 350 pc of the Seyfert 2 galaxy NGC 1125 to investigate the kinematic structure of the hot molecular ( $\sim 2000$  K) and ionized gas, as well as of the stars. The spectroscopic data have been obtained from the Gemini North telescope, using the NIFS instrument, and have a spatial resolution of approximately 80 pc and a spectral resolution of  $50 \text{ km s}^{-1}$ . The stellar kinematics was obtained from the fitting of CO absorption bands at  $\sim 2.3 \mu\text{m}$  and the stellar velocity field shows a rotation pattern well reproduced by a disk model. The gas excitation and kinematics were studied from the fitting of the [Fe II], [P II], H<sub>2</sub> and H recombination emission lines, by a Gauss-Hermite series and by Gaussian functions. The excitation of the H<sub>2</sub> and [Fe II] emission lines is possibly due to shocks and due the radiation field from the the active nucleus. The velocity field of the molecular gas is dominated by a rotation component in the galaxy's plane, similar to that of the stars, while the ionized gas also shows a bipolar outflow, with velocities of  $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ . This outflow interacts with the gas in the disk, producing a hot molecular gas outflow, seen only in the galaxy's nucleus. The masses of the hot molecular and ionized gases in the outflow are  $45 M_{\odot}$  and  $4.3 \times 10^4 M_{\odot}$ , respectively. These values correspond to about 32% of all the ionized gas and 15% of the hot molecular gas present in the central region of the galaxy. Assuming a biconical geometry, we estimate an outflow rate in ionized gas of  $\dot{M}_{\text{out}} \approx 6.0 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}^{-1}$  and a kinectic power of  $\dot{E}_{\text{kin}} \approx 4.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ , indicating that the observed outflows of NGC 1125 are not powerful enough to impact the star formation in the host galaxy, but can be efficient to redistribute the gas in its central region.

**Keywords:** Active Galactic Nuclei. Galaxies. Evolution of Galaxies.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – <i>Inflows</i> de gás ionizado em escalas de centenas de parsecs, observados para a galáxia NGC 1097 .....	15
Figura 1.2 – <i>Inflows</i> de gás molecular quente em escalas de dezenas de parsecs, observados para a galáxia NGC 4051 .....	17
Figura 1.3 – <i>Inflows</i> H <sub>2</sub> observados em NGC 2110 .....	18
Figura 1.4 – Representação dos principais processos de <i>feeding</i> de SMBH em diferentes escalas. ....	20
Figura 1.5 – Diagrama representativo da função luminosidade $\Phi(L)$ derivada a partir de observações (curva azul) e modelos teóricos (curva vermelha). ....	22
Figura 2.1 – Esquema do funcionamento do transporte do sinal até o NIFS. ....	25
Figura 3.1 – Exemplos de ajustes das bandas de absorção do CO em $\sim 2.30 \mu\text{m}$ para o <i>spaxel</i> nuclear, tomado como a posição coincidente com o pico da emissão contínua na banda K. ....	30
Figura 3.2 – Exemplos de ajustes dos perfis das linhas de emissão do [Fe II] $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ e Pa $\beta$ $\lambda 1.2822 \mu\text{m}$ por séries de Gauss-Hermite para o espectro nuclear. ....	32
Figura 3.3 – Exemplos de ajustes dos perfis das linhas de emissão do [Fe II] $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ e Pa $\beta$ $\lambda 1.2822 \mu\text{m}$ por duas funções Gaussianas por linha, para o espectro nuclear. ....	32
Figura 3.4 – Exemplos de ajustes dos perfis das linhas de emissão do H <sub>2</sub> $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$ e Br $\gamma$ $\lambda 2.16612 \mu\text{m}$ por séries de Gauss-Hermite para o espectro nuclear. ....	33
Figura 3.5 – Exemplos de ajustes dos perfis das linhas de emissão do H <sub>2</sub> $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$ e Br $\gamma$ $\lambda 2.16612 \mu\text{m}$ por duas funções Gaussianas por linha, para o espectro nuclear. ....	33
Figura 4.1 – Imagem em grande escala de NGC 1125, mapa de contínuo e exemplos de espectros .....	36
Figura 4.2 – Medidas da cinemática estelar em NGC 1125 .....	37
Figura 4.3 – Mapas de distribuição de fluxo obtidas pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas do [P II] $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$ (superior esquerdo), [Fe II] $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ (superior direito), Pa $\beta$ (inferior esquerdo) e H <sub>2</sub> (inferior direito). ....	39
Figura 4.4 – Mapas de campo de velocidades obtidos pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas de emissão do [P II] $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$ (superior esquerdo), [Fe II] $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ (superior direito), Pa $\beta$ (inferior esquerdo) e H <sub>2</sub> (inferior direito). ....	40
Figura 4.5 – Mapas de dispersão de velocidades obtidos pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas de emissão do [P II] $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$ (superior esquerdo), [Fe II] $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ (superior direito), Pa $\beta$ (inferior esquerdo) e H <sub>2</sub> (inferior direito). ....	41
Figura 4.6 – Mapas de $h_3$ obtidos pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas de emissão do [P II] $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$ (superior esquerdo), [Fe II] $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ (superior direito), Pa $\beta$ (inferior esquerdo) e H <sub>2</sub> (inferior direito). ....	42
Figura 4.7 – Mapas de $h_4$ obtidos pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas de emissão do [P II] $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$ (superior esquerdo), [Fe II] $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ (superior direito), Pa $\beta$ (inferior esquerdo) e H <sub>2</sub> (inferior direito). ....	43
Figura 4.8 – Mapas de razões de fluxo [Fe II]/Pa $\beta$ (superior esquerdo), [Fe II]/[P II] (su-	

	perior direito), $H_2/Br\gamma$ (inferior esquerdo) e mapa de excesso de cor $E(B-V)$ (inferior direito). . . . .	44
Figura 4.9	– Distribuições de fluxos das componentes estreita e larga das linhas de emissão. . . . .	46
Figura 4.10	– Mapas de campo de velocidades para a componente estreita (painéis superiores) e larga (painéis inferiores) das linhas do $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m$ (à esquerda), $Pa\beta$ (ao centro) e $H_2$ (à direita). . . . .	46
Figura 4.11	– Mapas de dispersão de velocidades para a componente estreita (painéis superiores) e larga (painéis inferiores) das linhas do $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m$ (à esquerda), $Pa\beta$ (ao centro) e $H_2$ (à direita). . . . .	47
Figura 5.1	– Mapeamento do campo de velocidades estelar obtido com a rotina pPXF (à esquerda) através do ajuste das bandas do CO presentes no espectro da banda K. O mapa central representa o ajuste de um modelo de disco em rotação para o campo de velocidades estelar obtido. À direita têm-se o mapa de resíduos, avaliado como a diferença entre o campo de velocidade estelar e modelo obtido. . . . .	49
Figura 5.2	– Mapas de resíduos de velocidades para as linhas do $[P II] \lambda 1.1886 \mu m$ (mapa superior esquerdo), $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m$ (mapa superior direito), $Pa\beta$ (mapa inferior esquerdo) e $H_2 \lambda 2.1218 \mu m$ (mapa inferior direito), obtidos a partir do modelo de rotação estelar dos campos de velocidades obtidos dos ajustes dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite. . . . .	52
Figura 5.3	– Mapas de resíduos de velocidades para a componente estreita das linhas $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m$ (mapa à esquerda), $Pa\beta$ (mapa central) e $H_2 \lambda 2.1218 \mu m$ (mapa à direita). . . . .	52
Figura 5.4	– Diagramas de diagnóstico $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m/Pa\beta$ vs. $H_2/Br\gamma$ (painel central) e $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m/Pa\beta$ vs. $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m/[P II] \lambda 1.1886 \mu m$ (painel da direita). O mapa de excitação mostrado no painel da esquerda utiliza a mesma codificação de cores usado no diagrama $[Fe II]/Pa\beta$ . . . . .	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGN	<i>Active Galaxy Nuclei</i>
ALMA	<i>Atacama Large Millimeter Array</i>
ALTAIR	<i>ALTitude conjugate Adaptative optics for the InfraRed</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CDM	<i>Cold Dark Matter</i>
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum (Largura à meia altura)</i>
HLR	<i>High Line Ratio</i>
IRAF	<i>Image-Reduction and Analysis Facility</i>
LINERs	<i>Low-ionization nuclear emission-line regions</i>
LOSVD	<i>Line-of-Sight Velocity Distribution</i>
NGC	<i>New General Catalogue</i>
NIFS	<i>Near-infrared Integral Field Spectrograph</i>
OVVs	<i>Optically Violent Variables</i>
PA	<i>Position Angle</i>
Pan-STARRS1	<i>Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System</i>
pPXF	<i>penalized Pixel-Fitting</i>
QSO	<i>Quasi-stellar objects</i>
SAA	<i>Research-School of Astronomy and Astrophysics</i>
SIMBAD	<i>Set of Identifications, Measurements and Bibliography for Astronomical Data</i>
SF	<i>Star Forming</i>
SMBH	<i>Supermassive Black Hole (Buraco Negro Supermassivo)</i>
SN	<i>Supernovas</i>
UV	<i>Ultraviolet</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $M_{\odot}$  Massa solar ( $\approx 2.0 \times 10^{30}$  kg)
- $L_{\odot}$  Luminosidade solar ( $\approx 3.84 \times 10^{26}$  W)
- Å Angström ( $10^{-10}$  m)
- pc Parsec ( $\approx 3.08 \times 10^{16}$  m)
- " Segundos de arco (arcsec)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	FEEDING .....	13
<b>1.1.1</b>	<b>Escalas extragalácticas</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Escalas galácticas</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1.3</b>	<b>Centenas de parsecs</b> .....	<b>14</b>
1.2	FEEDBACK .....	19
1.3	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS .....	22
<b>2</b>	<b>OBSERVAÇÕES E REDUÇÃO DOS DADOS</b> .....	<b>24</b>
2.1	O INSTRUMENTO NIFS .....	24
2.2	OBSERVAÇÕES .....	26
2.3	REDUÇÃO DOS DADOS .....	26
2.4	CUBO DE DADOS .....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>29</b>
3.1	CINEMÁTICA ESTELAR .....	29
3.2	AJUSTES DOS PERFIS DAS LINHAS DE EMISSÃO .....	31
3.3	MODELO DE DISCO EM ROTAÇÃO .....	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>35</b>
4.1	CINEMÁTICA ESTELAR .....	35
4.2	AJUSTES DOS PERFIS POR SÉRIES DE GAUSS-HERMITE .....	38
4.3	AJUSTES DOS PERFIS POR DUAS GAUSSIANAS .....	45
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES DOS RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
5.1	CINEMÁTICA ESTELAR .....	48
5.2	CINEMÁTICA DO GÁS .....	49
5.3	ORIGEM DA EMISSÃO DO GÁS .....	51
<b>5.3.1</b>	<b>Massas de gás e Feeding do AGN em NGC 1125</b> .....	<b>55</b>
5.4	TAXA E POTÊNCIA CINÉTICA DOS <i>OUTFLOWS</i> .....	56
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Galáxias compreendem um dos sistemas físicos mais complexos encontrados no Universo, e muito disso deve-se às interações físicas entre as várias componentes que as constituem, como o gás, a poeira e as estrelas. Essas componentes vinculam-se gravitacionalmente, formando galáxias com características próprias, mas que podem ser classificadas de acordo com padrões apresentados em suas morfologias, sendo o sistema de classificação de Hubble (Jones; Lambourne, 2004) o mais utilizado para tal finalidade. Entretanto, existe um conjunto de propriedades espectroscópicas e fotométricas de galáxias, a princípio independentes de suas classificações morfológicas, que nos permitem diferenciá-las em apenas dois tipos: galáxias normais e galáxias ativas.

A emissão de radiação de galáxias normais pode ser compreendida ao considerarmos a emissão do gás, das estrelas e da poeira presentes na galáxia. No óptico, a contribuição do gás ao espectro de uma galáxia normal é originada principalmente por regiões H II, estas sendo nuvens de gás constituídas primariamente por hidrogênio, e que são ionizadas por estrelas jovens, produzindo linhas de emissão de gás ionizado (Jones; Lambourne, 2004). A componente contínua do espectro de galáxias normais é dominada pela radiação térmica produzida pelas estrelas, sendo esta bem descrita como superposição de funções de corpo negro e linhas de absorção, com temperaturas efetivas características das populações estelares presentes na galáxia. Nuvens de poeira obscurecem a luz proveniente das estrelas, mas também contribuem para a emissão térmica de radiação em comprimentos de onda no infravermelho ( $2 \mu\text{m} \lesssim \lambda \lesssim 300 \mu\text{m}$ ) (Jones; Lambourne, 2004; Schneider, 2006).

Galáxias ativas, entretanto, possuem fenômenos altamente energéticos associados à emissão nuclear que não podem ser de natureza estelar. Uma das características mais proeminentes deste tipo de galáxia é a presença de núcleos brilhantes e espacialmente não resolvidos por telescópios óticos, em alguns casos podendo exceder a luminosidade das galáxias que os hospedam. Espectros da região central desses objetos revelam intensas linhas de emissão, e uma componente da radiação contínua descrita não por funções de corpo negro, mas sim por uma lei de potência  $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ , com  $\alpha$  sendo uma constante (Peterson, 1997). Observa-se também que o contínuo, juntamente com as linhas de emissão, são altamente variáveis no tempo em alguns objetos, em uma escala de tempo de semanas a anos (Jones; Lambourne, 2004), implicando que a fonte de energia central possui dimensões muito pequenas, com um limite superior de tamanho de 1 pc. Essas fontes são denominadas Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs) e podem ser classificadas a partir de suas luminosidades, atividade em rádio e orientações em relação à linha de visada, como prevista no modelo unificado (Urry; Padovani, 1995).

Os AGNs classificam-se em: Seyferts, Quasares, QSOs (*quasi-stellar objects*), Rá-

dio Galáxias, LINERs, OVVs e Objetos BL Lac. O objeto de estudo deste trabalho – a galáxia NGC 1125 – abriga um AGN do tipo Seyfert 2, sendo esta uma subclassificação para núcleos Seyfert que apresentam apenas linhas de emissão estreitas do H e He em seus espectros. Como propriedade geral das galáxias Seyfert, a luminosidade do núcleo, no óptico, é comparável à luminosidade do restante da galáxia ( $L \approx 10^{11} L_{\odot}$ ) (Peterson, 1997). Um desenvolvimento detalhado sobre os outros tipos AGNs pode ser encontrado em Peterson (1997).

O paradigma atual que torna compreensível a intensa emissão de energia por AGNs fundamenta-se no cenário em que um Buraco Negro Supermassivo (SMBH) na região central converte a energia potencial gravitacional do gás em queda em direção ao SMBH em energia cinética e radiativa. Presumindo que o gás tenha momento angular não nulo, a captura de matéria pelo SMBH é feita através de um disco de acreção, constituído principalmente por gás de alta ionização. A energia potencial gravitacional primeiro converte-se em energia cinética, gerando colisões entre nuvens de gás, transferindo momento angular. O disco, por sua vez, rotaciona com velocidade diferencial kepleriana ao longo de sua extensão (Schneider, 2006). A diferença de velocidade da matéria ao longo do disco causa um aquecimento por fricção, originando uma distribuição radial de temperatura, com o centro mais quente do que as bordas. Desta forma, uma aproximação da emissão do disco pode ser entendida como a superposição de anéis de emissão de corpo negro, onde a temperatura varia de maneira inversamente proporcional com o raio  $T \propto r^{-3/4}$  (Schneider, 2006). Modelos mais precisos preveem temperaturas das regiões mais internas do disco podendo chegar a  $10^9$  K, descrevendo a emissão do AGN em raios-X duros (Liu; Mineshige; Ohsuga, 2003; You; Cao; Yuan, 2012).

A emissão de energia em AGNs, portanto, está diretamente relacionada com a presença de quantidades significativas de gás que se deslocam em direção ao núcleo e formam o disco de acreção. Desta forma, processos físicos e interações que transportam grandes quantidades de matéria até a região central, chamados de processos de *feeding*, desempenham um papel fundamental na atividade do núcleo ativo, suprindo a necessidade de matéria nas imediações do SMBH e contribuindo para seu aumento em massa. Parte da energia convertida é emitida na forma de fótons ionizantes, cuja interação com a material na vizinhança pode perturbar a distribuição espacial do gás através da pressão de radiação (Schneider, 2006), gerando *outflows* que podem reduzir a disponibilidade de matéria no entorno do SMBH. Os efeitos dos *outflows*, jatos de partículas e radiação do AGN na evolução da galáxia hospedeira compreendem o processo que chamamos de *feedback* de AGN. Os mecanismos de *feeding*, juntamente com o *feedback* do AGN, criam vínculos evolucionários entre o SMBH e a galáxia hospedeira, que podem ser observados e reproduzidos em simulações computacionais (Storchi-Bergmann; Schnorr-Müller, 2019).

Como mencionado acima, a alimentação dos buracos negros se dá a partir da captura de matéria através dos mecanismos de *feeding* do AGN. Para que o material possa ser

capturado pelo SMBH, é necessário que haja um reservatório de gás na região central da galáxia, próximo o bastante do SMBH para que seu campo gravitacional seja dominante. Escoamentos de gás em direção ao centro de galáxias, os quais iremos chamar doravante simplesmente de *inflows*, tem sido observados desde dezenas de parsecs até escalas galácticas. Ejeções de matéria a partir do AGN central também são observadas, as quais serão chamadas de *outflows*. A seguir, discutem-se os processos de *feeding* e *feedback* em núcleos Seyfert.

## 1.1 FEEDING

Diferentes processos de *feeding* de AGN são dominantes em diferentes escalas, indo desde regiões extragalácticas ( $> 10$  kpc) até a região nuclear (1–10 pc). Uma revisão sobre esses processos é apresentada em Storchi-Bergmann e Schnorr-Müller (2019) e resumida abaixo.

### 1.1.1 Escalas extragalácticas

Estudos como apresentados em Treister et al. (2012) e Urrutia, Lacy e Becker (2008) mostram uma correlação entre AGNs luminosos ( $L \geq 10^{46}$  erg s $^{-1}$ ) e *Major Mergers*, sugerindo que o último desempenha um papel importante na alimentação do SMBH. *Major Mergers* consistem na interação entre duas galáxias com massas comparáveis. Destabilizações gravitacionais intensas podem perturbar grandes quantidades de matéria nas galáxias interagentes, alterando drasticamente as órbitas do gás, originando *inflows* massivos que alcançam a região central da galáxia e iniciam a atividade nuclear (Schneider, 2006), além de propiciar a formação estelar em galáxias (Storchi-Bergmann; Schnorr-Müller, 2019). Entretanto, estudos recentes, como o de Trakhtenbrot et al. (2017), mostram que alguns quasares de alto *redshift* ( $z > 2$ ) não possuem galáxias interagentes, concluindo que outros mecanismos, como processos seculares, também desempenham ou são os principais responsáveis por desencadear a atividade nuclear e alimentar o SMBH central (Storchi-Bergmann; Schnorr-Müller, 2019).

De acordo com Storchi-Bergmann e Schnorr-Müller (2019), *Minor Mergers*, que são as interações de galáxias com massas diferentes, com uma razão entre as massas das galáxias maior do que 4, podem suprir material para uma galáxia massiva pobre em gás e potencialmente desencadear sua atividade nuclear. Neistein e Netzer (2013), em seu trabalho, utilizaram um modelo semi-analítico para acreção de matéria por SMBH, concluindo que interações do tipo *Minor Mergers* constituem o principal processo de *feeding* do AGN em galáxias de luminosidades intermediárias ( $L_{AGN} \leq 10^{44}$  erg s $^{-1}$ ).

Ainda de acordo com Storchi-Bergmann e Schnorr-Müller (2019), *Chaotic Cold Accretion* em aglomerados de galáxias também podem alimentar o AGN. O plasma da região intergaláctica quente eventualmente esfria, formando filamentos quentes que se condensam e são capturados caoticamente à medida que viajam para a região central da galáxia.

### 1.1.2 Escalas galácticas

Processos seculares, como desenvolvido em Storchi-Bergmann e Schnorr-Müller (2019), estão associados a *inflows* e à alimentação de SMBH de baixa massa ( $M_{\text{SMBH}} \leq 10^7 M_{\odot}$ ), sendo também responsáveis por alimentar AGNs localizados em altos *redshifts* ( $z \geq 1$ ). Os processos seculares são fenômenos lentos e constantes que levam a evolução da galáxia ao longo do tempo, os quais incluem a interação entre as galáxias e o ambiente em que estão localizadas, resultando na captura de gás ou galáxias satélites e processos internos, como resultantes de barras e braços espirais.

Embora barras nucleares possam, em teoria, produzir *inflows* pela transferência de momento angular no interior do disco, uma série de estudos, mencionados em Storchi-Bergmann e Schnorr-Müller (2019) concluem que barras em escalas galácticas não aparentam alimentar diretamente o AGN, uma vez que tais estudos não encontram diferenças estatisticamente significativas na frequência de AGNs em galáxias barradas e não barradas.

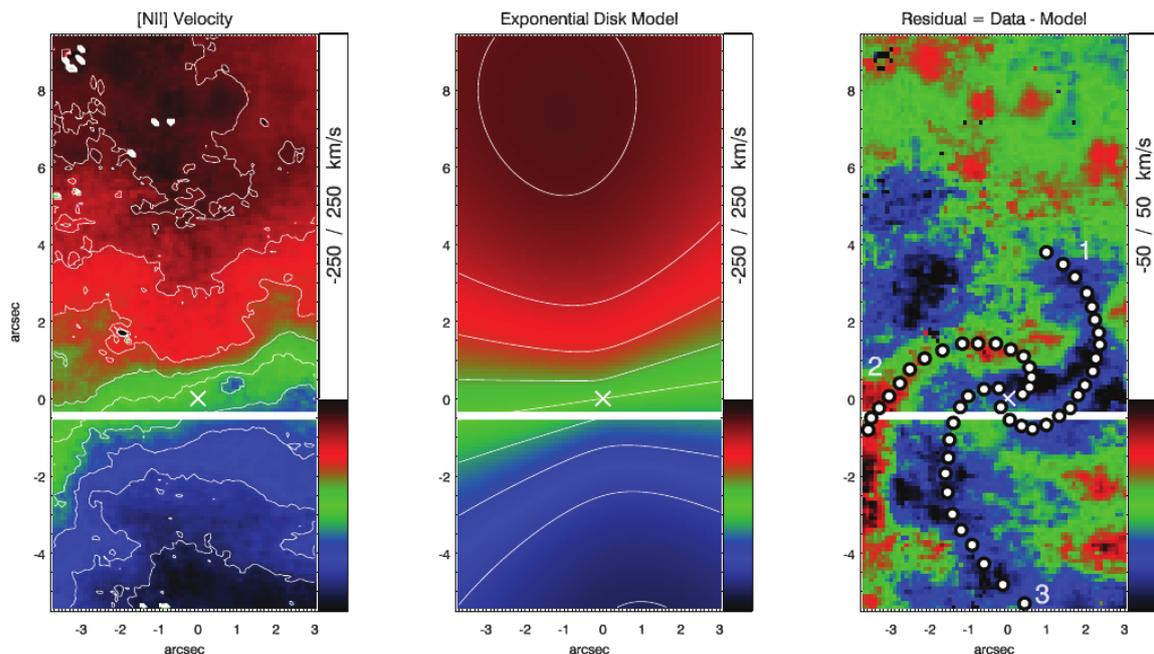
### 1.1.3 Centenas de parsecs

*Inflows* associados a processos de *feeding* do AGN em escalas de centenas de parsecs conectam-se diretamente com o presente trabalho, que consiste na utilização de observações espectroscópicas de campo integral no infravermelho próximo da região central da galáxia NGC 1125, com o intuito de identificar movimentos não circulares do gás presente em escalas de dezenas a centenas de parsecs na região central da galáxia. *Inflows* de gás molecular e ionizado nas escalas mencionadas acima têm sido detectados em galáxias Seyfert do Universo Local utilizando observações ópticas, no infravermelho próximo e em bandas milimétricas. Alguns exemplos são apresentados a seguir.

Um dos primeiros estudos a identificar escoamentos de gás em direção a um núcleo ativo de galáxia foi realizado por Fathi et al. (2006). Os autores utilizaram observações de espectroscopia de campo integral no óptico da região interna a 700 pc da galáxia NGC 1097, hospedeira de um núcleo ativo do tipo LINER, revelando a presença de movimentos não circulares do gás ionizado, interpretado como *inflows* pelos autores. A Figura 1.1

mostra o campo de velocidades do gás, observado para NGC 1097 no mapa à esquerda, o qual apresenta assimetrias que não são compatíveis unicamente com a rotação do gás no plano do disco. Com o objetivo de isolar os movimentos não-circulares, Fathi et al. (2006) ajustaram o campo de velocidades observado por um modelo de disco em rotação (mapa central) e construíram um mapa de velocidades residuais, subtraindo o modelo das velocidades observadas (mapa à direita). Os maiores resíduos são vistos em braços espirais, com valores positivos (*redshifts*) vistos no lado próximo da galáxia e valores negativos (*blueshifts*) no lado distante. Esses resíduos foram interpretados como *inflows* em direção ao núcleo da galáxia através de braços espirais nucleares, assumindo-se que o gás está localizado no plano do disco da galáxia.

Figura 1.1 – *Inflows* de gás ionizado em escalas de centenas de parsecs, observados para a galáxia NGC 1097 por Fathi et al. (2006). O mapa da esquerda mostra o campo de velocidades para a linha de emissão do  $[N II]\lambda 6583$ , o painel central mostra um modelo de disco em rotação e o mapa da direita mostra as velocidades residuais entre as velocidades observadas e o modelo.



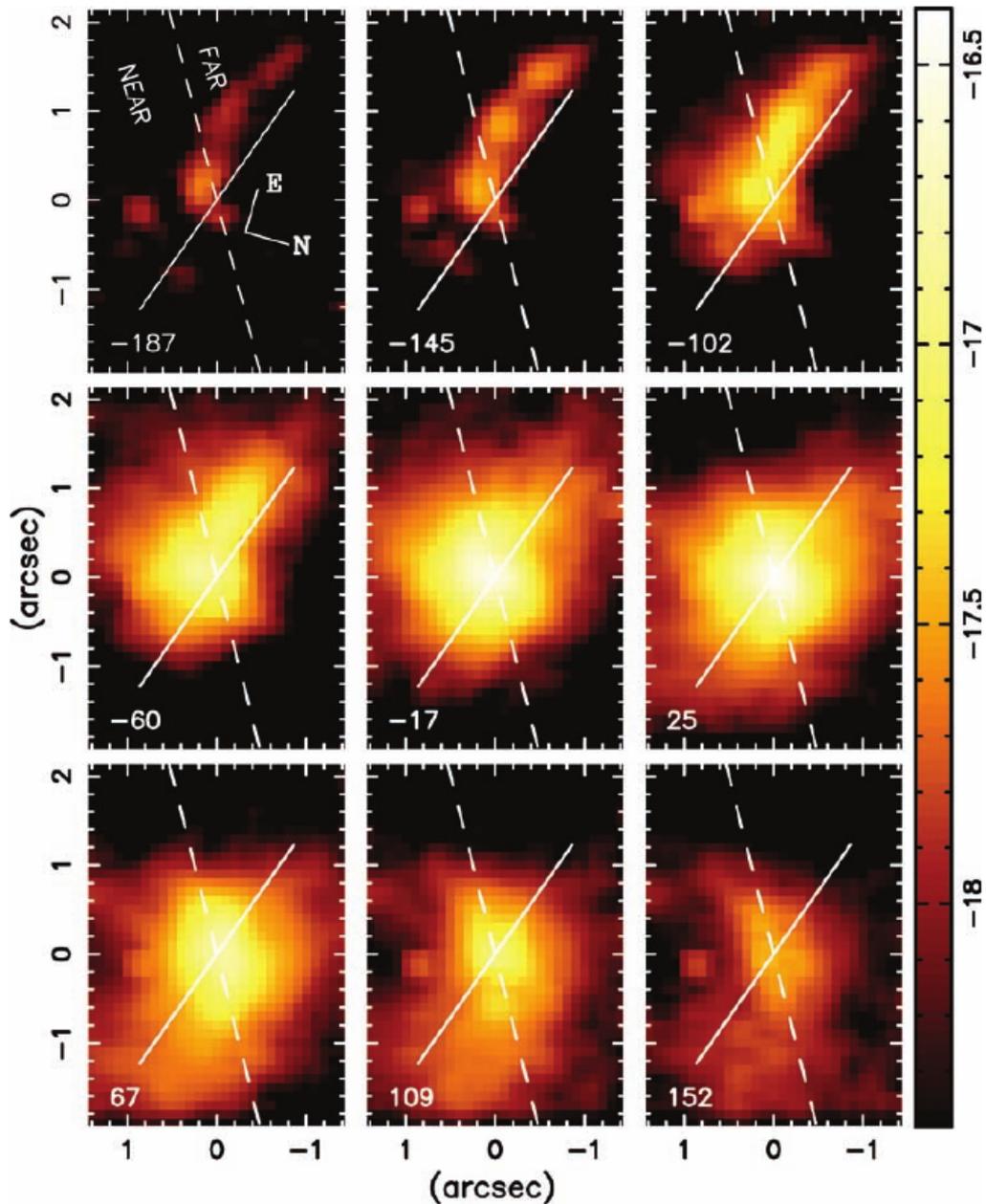
Fonte: Fathi et al. (2006).

Em um trabalho posterior, Storchi-Bergmann et al. (2007) adotaram a mesma metodologia empregada por Fathi et al. (2006) e utilizaram observações de espectroscopia de campo integral com o instrumento GMOS do telescópio Gemini Norte para mapear a distribuição de fluxo e cinemática do gás na região central da galáxia NGC 6951. A diferença entre o campo de velocidades do gás ionizado em relação a um modelo de disco em rotação revelou componentes cinemáticas não associadas à rotação pura, interpretado pelos autores como *inflow* de gás ao longo de espirais nucleares até  $\approx 100$  pc do núcleo. Um resultado semelhante foi encontrado em um outro estudo sobre a galáxia NGC 1097

(Storchi-Bergmann et al., 2007). Seguindo procedimentos semelhantes para isolar os desvios de rotação do gás no disco, os autores puderam atribuir os movimentos não circulares como *inflows* de gás ao longo de braços espirais, levando o gás a  $\approx 10$  pc até escalas nucleares. Posteriormente, diversos outros estudos utilizaram a técnica de espectroscopia de campo integral e foram bem sucedidos na identificação e caracterização de *inflows* de gás ionizado em AGNs de baixa luminosidade (Schnorr-Müller et al., 2014a; Müller; Storchi-Bergmann; Nagar, 2012; Schnorr-Müller et al., 2014b, 2017).

Os *inflows* de gás ionizado são observados principalmente em núcleos ativos de baixa luminosidades, como os LINERs. Em objetos mais luminosos, em geral, o gás ionizado apresenta assinaturas de *outflows* a partir do núcleo. Entretanto, o gás molecular apresenta uma cinemática menos perturbada, de forma que estudos de transições do gás molecular, como linhas do  $H_2$  observadas no infravermelho próximo, podem ser utilizadas para buscar investigar os mecanismos de escoamentos de gás em direção ao AGN. Em escalas menores que 1 kpc, Riffel et al. (2008) foram pioneiros na detecção de *inflows* de  $H_2$  utilizando espectroscopia de campo integral no infravermelho próximo da região central da galáxia NGC 4051, que abriga um núcleo ativo do tipo Seyfert 1. A Figura 1.2, retirada de Riffel et al. (2008), mostra os mapas de fluxo em diferentes *bins* de velocidades ao longo do perfil da linha de emissão do  $H_2$  em  $2.1218 \mu\text{m}$ . Observa-se uma estrutura espiral em *bins* de velocidades negativas (*blueshift*) observada no lado distante da galáxia e um estrutura análoga em *redshift* no lado próximo. Essa estrutura foi interpretada pelos autores como sendo devido a um escoamento de gás molecular em direção ao núcleo da galáxia a uma taxa de  $\sim 5 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{ano}$ , duas ordens de grandeza menor do que a taxa de acreção do SMBH da galáxia.

Figura 1.2 – *Inflows* de gás molecular quente em escalas de dezenas de parsecs, observados para a galáxia NGC 4051 por Riffel et al. (2008). A figura mostra mapas de fluxos ao longo do perfil da linha do  $H_2$  em  $2.1218 \mu\text{m}$  com incrementos de velocidades de  $42 \text{ km s}^{-1}$ . A cruz marca a posição do núcleo e os lados próximo e distante da galáxia são indicados.



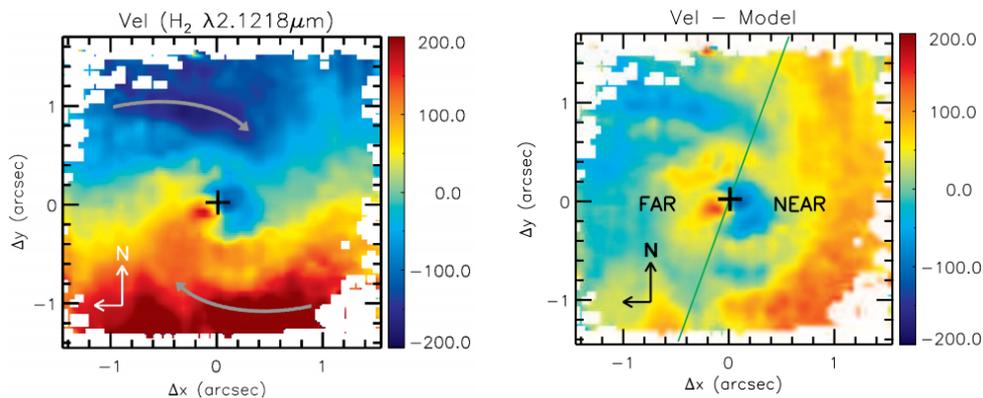
Fonte: Riffel et al. (2008).

Posteriormente, outros trabalhos identificaram *inflows* de gás molecular utilizando observações no infravermelho próximo (Müller Sánchez et al., 2009; Riffel; Storchi-Bergmann; Winge, 2013a; Diniz et al., 2015). Por exemplo, Diniz et al. (2015) detectaram componentes cinemáticas do gás molecular ( $H_2$ ) associadas a *inflows* ao longo de espirais nucleares a  $\sim 70 \text{ pc}$  do núcleo da galáxia Seyfert 2 NGC 2110. Os autores mapearam o campo de

velocidades do  $H_2$  quente a partir de observações com o instrumento NIFS no telescópio Gemini Norte, o ajustaram por um modelo de rotação e analisaram o mapa de resíduos. Na Figura 1.3, retirada de Diniz et al. (2015), apresenta-se o campo de velocidades para a linha  $H_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$  no painel da esquerda e o mapa de resíduos é apresentado no painel da direita. O campo de velocidades claramente apresenta distorções em relação a um padrão de rotação típico e o mapa de resíduos revela excessos de *blueshifts* no lado distante e de *redshifts* no lado próximo do disco, os quais foram interpretados como *inflows*. Além dos *inflows*, observa-se um *outflow* compacto, identificado pelos *redshifts/blushifts* no lado distante/próximo da galáxia na região interna a  $0''.5$ . A taxa de *inflow* de gás molecular quente foi estimada em  $\approx 4.6 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ . Os autores interpretaram um possível cenário onde *inflows* observados em  $H_2$  podem alimentar o AGN diretamente ou iniciar a formação estelar, com ventos oriundos da evolução de estrelas massivas desencadeando a atividade nuclear de NGC 2110.

Resultados como os *inflows* detectados ao longo de braços espirais são respaldados por simulações hidrodinâmicas, como em Maciejewski et al. (2002), os quais mostram que *inflows* podem ser produzidos por choques em espirais na região interior a 1 kpc, originando taxas de *inflows* suficientes para alimentar um AGN de baixa luminosidade (Storchi-Bergmann; Schnorr-Müller, 2019).

Figura 1.3 – Campo de velocidades do  $H_2$  para a galáxia NGC 2110 (esquerda) e mapa de resíduos (direita). Os excessos de *blueshifts* no lado distante da galáxia e os excessos de *redshifts* no lado próximo são interpretados como *inflows* ao longo de braços espirais, representados pelas setas.



Fonte: Diniz et al. (2015).

O  $H_2$  quente, responsável pelas linhas de emissão no infravermelho próximo, representa somente uma pequena parcela do gás molecular total na região central das galáxias. A cinemática e distribuição do gás molecular frio podem ser estudados utilizando observações em comprimentos de onda milimétricos, como as obtidas como o *Atacama Large Millimeter Array* (ALMA). A cinemática do gás molecular frio no kpc central de galáxias ativas, observada através da emissão de linhas da molécula de CO utilizando o ALMA,

também apresenta assinaturas de *inflows* de gás em direção ao centro de galáxias ativas próximas (Combes et al., 2013; Ramakrishnan et al., 2019).

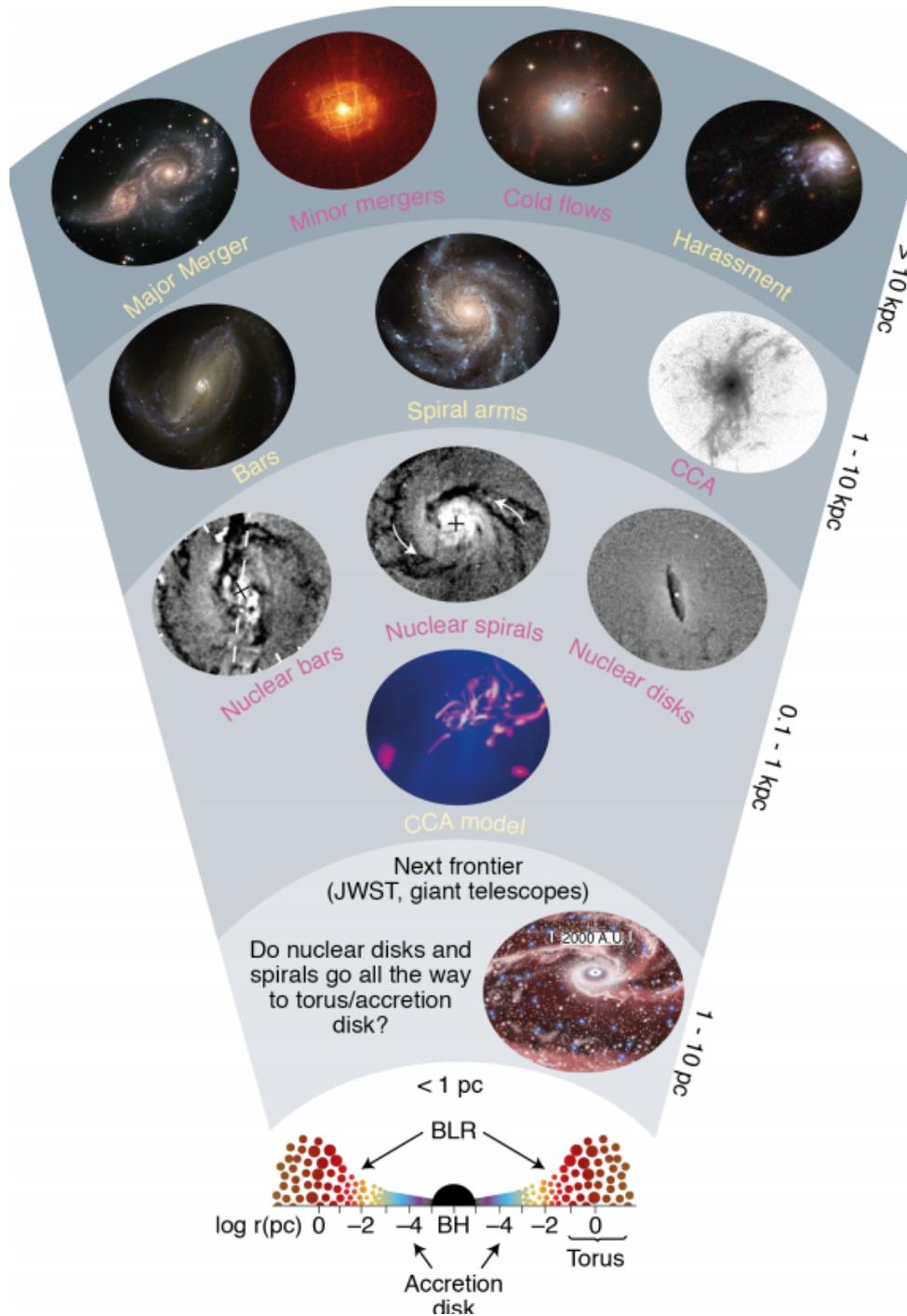
A Figura 1.4, retirada de Storchi-Bergmann e Schnorr-Müller (2019), apresenta uma representação esquemática dos mecanismos de transporte de matéria em direção ao núcleo de galáxias, desde escalas extragalácticas até escalas de parsecs. Mais detalhes sobre os diferentes mecanismos de transporte de matéria em direção ao centro das galáxias e posterior alimentação do SMBH podem ser encontrados em Storchi-Bergmann e Schnorr-Müller (2019).

## 1.2 FEEDBACK

Uma vez que o AGN é alimentado pela matéria propiciada pelos diferentes mecanismos de *feeding* discutidos anteriormente, iniciam-se os processos de conversão de energia no disco de acreção, onde parte da energia convertida é irradiada pela fonte luminosa central. Como já mencionado, o *feedback* do AGN na forma radiativa pode interagir com o gás interestelar pela pressão de radiação, possivelmente dificultando a queda de matéria em direção ao núcleo, e por consequência afetando a continuidade da atividade nuclear e o aumento em massa do SMBH (Schneider, 2006; MO; BOSCH; WHITE, 2010). O *feedback* na forma de *outflows*, como ventos e jatos de partículas do AGN, juntamente com o *feedback* radiativo, impactam de maneira geral o meio interestelar de forma a ocasionar ou cessar a formação de novas estrelas, regulando diretamente a massa estelar do bojo da galáxia hospedeira (Fabian, 2012). Com isso, estabelece-se um vínculo evolucionário entre o SMBH e a galáxia hospedeira, proporcionados pelos mecanismos de *feeding* e *feedback*.

O *feedback* do AGN possui diversas naturezas energéticas, de acordo com os processos físicos que o origina. Em geral, podemos agrupar esses fenômenos em dois tipos, sendo estes processos radiativos e mecânicos (MO; BOSCH; WHITE, 2010). Processos radiativos incluem a pressão de radiação devido à luminosidade do AGN, mencionada acima, e aquecimento radiativo, ambos transferindo energia para a matéria interestelar. Para melhor compreender a natureza dos processos radiativos, em particular a pressão de radiação, é válido considerar um modelo simplificado em que em que a luminosidade  $L$  do AGN é proporcional à taxa de acreção de matéria ao SMBH, de forma que pela relação direta entre massa e energia, podemos identificar  $L = \epsilon \dot{M} c^2$ , onde  $\dot{M}$  é a taxa de acreção de massa  $dM/dt$  ao SMBH e  $\epsilon$  é um fator que mede a eficiência com que o processo de conversão de energia ocorre (Peterson, 1997). Isto implica que a luminosidade do AGN e da taxa de acreção de matéria estão diretamente relacionadas, de modo que a variabilidade na luminosidade do núcleo, característica dos AGNs, pode ser entendida como sendo proporcional ao quanto varia a acreção de matéria em um dado período de tempo.

Figura 1.4 – Representação dos principais processos de *feeding* de SMBH em diferentes escalas.



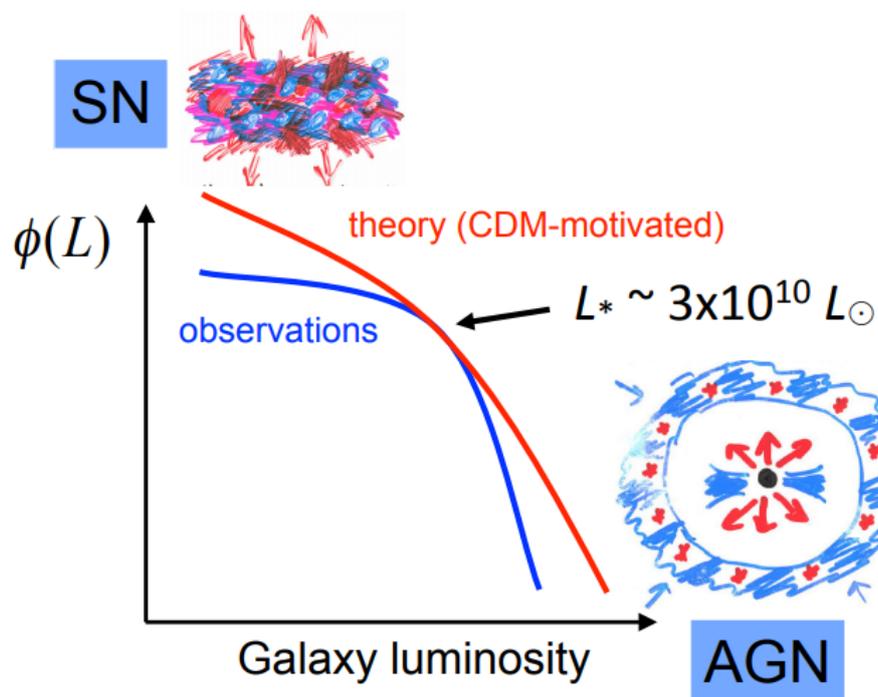
Fonte: Storchi-Bergmann e Schnorr-Müller (2019).

Levando em conta que a matéria também pode sofrer os efeitos da pressão de radiação, considera-se novamente um caso simplificado onde o núcleo emissor pode ser aproximado por uma fonte puntual e isotrópica (a energia é irradiada igualmente em todas as direções). O fluxo a uma distância  $r$  do núcleo de luminosidade  $L$  é dado por  $F = L/4\pi r^2$ , e a pressão de radiação será, portanto  $F/c = L/4\pi r^2 c$ , onde  $c$  é a velocidade da luz. Assumindo, por conveniência, que o gás esteja completamente ionizado, este experimenta uma força orientada na direção radial, no sentido para fora do núcleo, que vale  $F_r = \sigma_e L/4\pi r^2 c$ , onde  $\sigma_e$  é a seção de choque do espalhamento Thomson (Peterson, 1997). Como desenvolvido em Schneider (2006), a queda da matéria circum-nuclear em direção ao núcleo ocorrerá somente quando a força gravitacional gerada pelo SMBH for maior que a força devido ao espalhamento de elétrons pela radiação a uma distância  $r$ , ou seja  $Gm_p M_{SMBH}/r^2 > \sigma_e L/4\pi r^2 c$ , onde  $m_p$  é a massa do próton. Podemos isolar a luminosidade  $L$  na relação anterior e identificá-la como o limite da potência de um AGN para que haja acreção de matéria, ou seja,  $L < 4\pi Gcm_p M_{SMBH}/\sigma_e = L_{edd}$ , onde  $L_{edd}$  é a luminosidade de Eddington (Schneider, 2006; Peterson, 1997).

Fenômenos de *feedback* de origem mecânica incluem ventos emanados das partes mais externas do disco de acreção e jato de partículas relativísticas, aceleradas por campos magnéticos intensos e colimados devido ao movimento rotacional do plasma no disco de acreção. Ventos do AGN ocorrem quando porções de gás no disco de acreção adquirem energia suficiente para superar velocidade de escape daquela região, de maneira a serem ejetados para fora da região central, possivelmente interagindo com o gás interestelar. A interação de ventos com o meio interestelar pode afetar a formação estelar na região de impacto, sendo comprimindo o gás e aumentando a taxa de formação estelar (o chamado *feedback* positivo) ou aquecendo o gás molecular e impedindo que ele colapse para formar novas estrelas (o chamado *feedback* negativo).

A Figura 1.5 extraída de Silk e Mamon (2012) mostra a função de luminosidade galáctica  $\Phi(L)$  em função da luminosidade, onde a curva vermelha representa o resultado previsto pela teoria CDM e a curva em azul representa as observações. Para baixas luminosidades galácticas (baixas massas), a divergência entre o modelo e as observações é provavelmente devido ao *feedback* de supernovas (SN), enquanto que para altas luminosidades (ou altas massas), o *feedback* do AGN é o provável causador da discrepância entre a previsão da teoria e as observações. Para uma massa que corresponde a uma luminosidade  $L_* \sim 3 \times 10^{10} L_\odot$ , as observações e o modelo parecem convergir. Isso evidencia que modelos de formação e evolução de galáxias que não levam em conta a influência do *feedback* de AGNs e supernovas, não conseguem reproduzir uma distribuição de galáxias de alta e baixa massa, respectivamente. Dessa forma, estudar os processos de *feeding* e *feedback* de AGN é fundamental para entender como as galáxias evoluem.

Figura 1.5 – Diagrama representativo da função luminosidade  $\Phi(L)$  derivada a partir de observações (curva azul) e modelos teóricos (curva vermelha).



Fonte: Silk e Mamon (2012)

### 1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Neste trabalho, apresenta-se uma análise da distribuição e cinemática do gás molecular e ionizado, bem como das estrelas, na região central da galáxia NGC 1125. São utilizados dados espectroscópicos nas bandas J e K, obtidos com o instrumento NIFS do telescópio Gemini Norte. NGC 1125 é uma galáxia classificada morfologicamente como (R')SB(r)0/a? e hospeda um núcleo ativo do tipo Seyfert 2 (Véron-Cetty; Véron, 2006). Está localizada a uma distância de 45.9 Mpc (Theureau et al., 1998), para a qual 1''0 corresponde a aproximadamente 230 pc na galáxia. NGC 1125 faz parte de uma amostra maior, onde observações similares estão sendo realizadas para 20 galáxias Seyfert luminosas do Universo Local utilizando-se o NIFS como parte do projeto "*Gemini NIFS survey of feeding and feedback processes in nearby active galaxies*" (Riffel et al., 2018). Este projeto pretende investigar os processos de *feeding* e *feedback* de AGN em galáxias próximas em escalas de dezenas a centenas de parsecs.

O objetivo geral desse trabalho consiste em estudar os processos de *feeding* e *feedback* do núcleo ativo da galáxia NGC 1125. Esse estudo é realizado através da análise detalhada da cinemática do gás molecular (utilizando as linhas de emissão do  $H_2$  na banda K), ionizado (a partir das linhas de emissão do [Fe II] e de recombinação do H) e cinemática estelar, obtida a partir do ajuste das bandas de absorção do CO em  $\sim 2.3 \mu\text{m}$ . A relevância

desse estudo está no fato de que simulações cosmológicas, como em Hopkins e Elvis (2010), indicam que o AGN tem um papel importante na evolução de galáxias e estudos com o realizado para NGC 1125 são necessários para fornecer os vínculos observacionais aos modelos teóricos.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar a cinemática estelar de NGC 1125, a partir do ajuste das bandas de absorção do CO presentes na banda K;
- Investigar os mecanismos de excitação do gás e de produção das linhas de emissão do  $H_2$  e [Fe II], presentes no espectro de NGC 1125;
- Separar as diferentes componentes cinemáticas do gás, tais como movimentos dominados por rotação e movimentos não-circulares;
- Caracterizar *outflows* de gás a partir do núcleo da galáxia.

## 2 OBSERVAÇÕES E REDUÇÃO DOS DADOS

### 2.1 O INSTRUMENTO NIFS

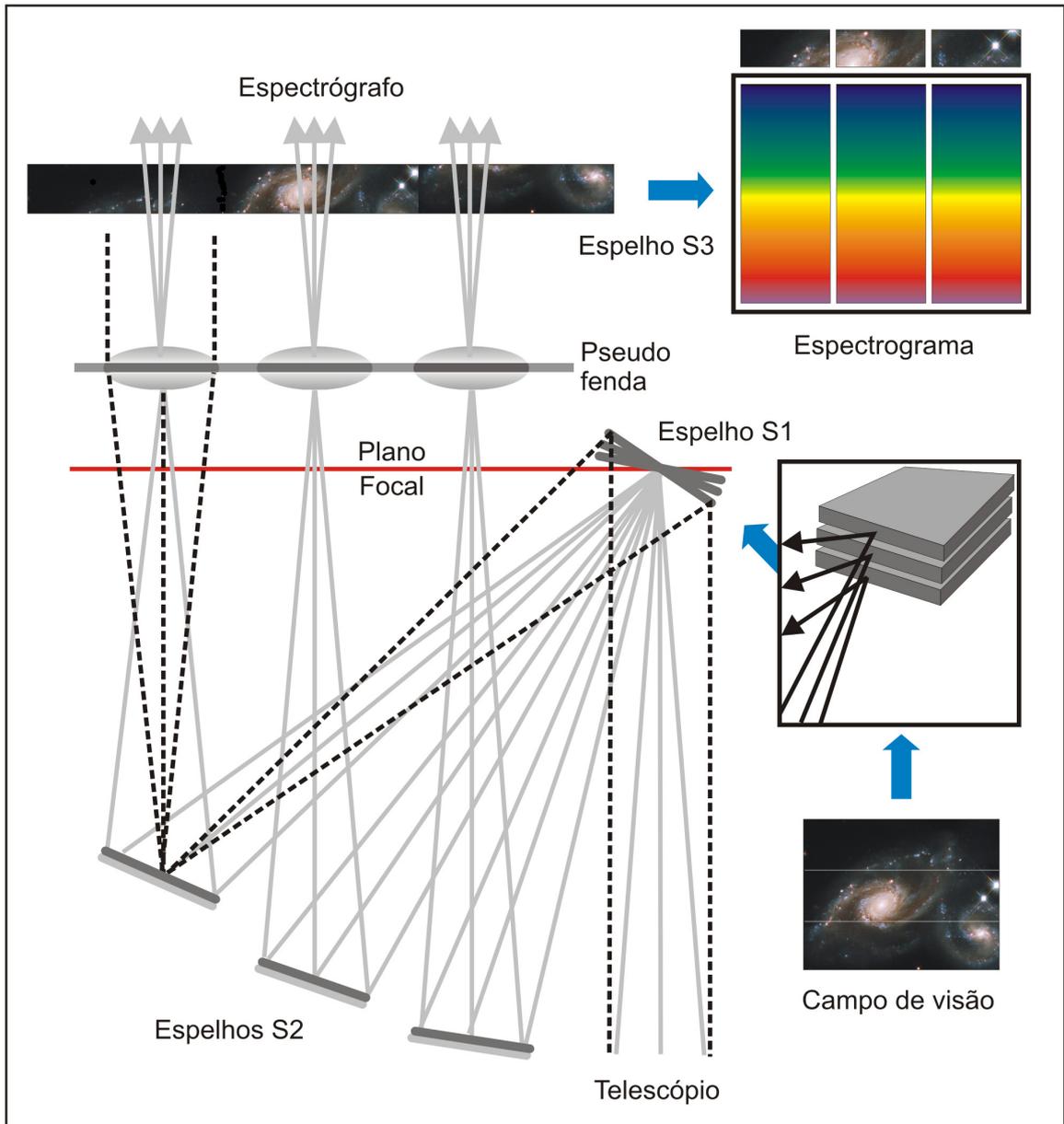
O observatório Gemini constitui-se de dois telescópios de 8.1 m de diâmetro, cujas observações podem cobrir praticamente todo o céu. O telescópio Gemini Norte está localizado no pico Mauna Kea no Havaí, EUA e o telescópio Gemini Sul localiza-se em Cerro Pachón, no Chile. O instrumento Near-infrared Integral Field Spectrograph (NIFS) é um espectrógrafo de campo integral, instalado no telescópio Gemini Norte e que opera na faixa do infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

O instrumento NIFS (McGregor et al., 2003) é capaz de obter espectros no intervalo espectral de 0.95 a 2.40  $\mu\text{m}$ , cujas observações podem ser realizadas nas bandas Z, J, H, K, Ks e KI. O NIFS foi desenvolvido pela SAA (*Research-School of Astronomy and Astrophysics*) da *Australian National University*, possui um detector do tipo CCD de  $2048 \times 2048$  pixels e um campo de visão de aproximadamente  $3'' \times 3''$ . Ele pode operar juntamente com o sistema de óptica adaptativa do telescópio Gemini Norte, o *ALTitude conjugate Adaptive optics for the InfraRed* (ALTAIR), permitindo a obtenção de dados com resolução angular de cerca de  $0''.1$ .

O telescópio coleta a radiação do objeto de interesse, a qual é transportada ao detector através de um conjunto de espelhos, chamados de *slices*. Seu projeto é baseado no método *Advanced Image Slicer* desenvolvido por Content (1997). A imagem do objeto de ciência é fatiada em sub-imagens, e as *slices* são organizadas lado a lado na entrada do espectrógrafo, simulando uma fenda longa. A Figura 2.1 mostra uma representação esquemática do método *Advanced Image Slicer*, com somente 3 *slices*.

Em resumo, no caso do NIFS, a imagem do objeto de interesse é fatiada utilizando 29 espelhos. Na Figura 2.1, o esquema é apresentado para 3 espelhos. O conjunto de pequenos espelhos S1 são responsáveis por dividir a imagem em sub-imagens, que são redirecionadas e refletidas pelo grupo de espelhos representados por S2. Os espelhos S2 refletem as imagens de forma a reorganizá-las lado a lado em um conjunto de espelhos S3, na entrada do espectrógrafo, simulando fendas longas. Então, a radiação passa pelo colimador, pela rede de difração e finalmente detectada pelo CCD.

Figura 2.1 – Esquema do funcionamento do transporte do sinal até o NIFS.



Fonte: Allington-Smith et al. (2006), com algumas modificações.

## 2.2 OBSERVAÇÕES

A galáxia NGC 1125 foi observada nas bandas J e K, como parte do projeto “*Gemini NIFS survey of feeding and feedback processes in nearby active galaxies*”(Riffel et al., 2018), que tem como investigadora principal a Dra. Thaisa Storchi-Bergmann. As observações foram realizadas no segundo semestre de 2018, sob o código do projeto GN-2018B-Q-140. Devido a inexistência de estrelas brilhantes próximas ao objeto e ao fato de o núcleo da galáxia não ser brilhante o suficiente para guiar o telescópio nas observações, utilizando o módulo de óptica adaptativa, as observações foram realizadas sem a utilização deste módulo em boas condições de observação.

As observações da banda J foram realizadas na noite de 12 de agosto de 2018, já as observações da banda K foram realizadas em 31 de agosto de 2018. Foram realizadas 8 exposições de 450 s em cada banda. As observações da banda J foram centradas no comprimento de onda  $1.25 \mu\text{m}$  e as da banda K em  $2.20 \mu\text{m}$ . Antes e após a observação da galáxia em cada banda, foram obtidos espectros de estrelas padrão telúricas, que foram utilizados durante o processo de redução de dados para remover as absorções telúricas dos espectros da galáxia, bem como para a calibração em fluxo.

## 2.3 REDUÇÃO DOS DADOS

Os dados foram reduzidos seguindo o procedimento padrão de redução de dados do NIFS, conforme descrito em Riffel et al. (2018). O procedimento de redução dos dados foi realizado pelo Dr. Rogemar A. Riffel, orientador deste trabalho. Todas as etapas da redução foram realizadas utilizando o pacote *gemini.nifs* do software IRAF (*Image-Reduction and Analysis Facility*), desenvolvido especialmente para o processamento de dados obtidos com o instrumento NIFS pelo Observatório Gemini. Em resumo, as seguintes etapas fazem parte do processo:

- Divisão por *flat-field*;
- Subtração do céu;
- Calibração do comprimento de onda;
- Correção da distorção espacial;
- Remoção de absorções telúricas;
- Calibração em fluxo dos espectros;
- Construção dos cubos de dados para as exposições individuais;

- Média dos cubos individuais, produzindo um cubo de dados para cada banda.

Um detector do tipo CCD é formado por uma matriz de pixels com tamanhos bem definidos, e sua função é coletar fótons provenientes de fontes de radiação. Porém, a contagem de fótons pode variar pixel a pixel, mesmo se forem incididos pela mesma radiação. Essa variação pixel a pixel é corrigida utilizando-se arquivos de *flat-field*, obtidos a partir da iluminação do detector por uma fonte homogênea (lâmpada) de radiação. Durante a redução dos dados faz-se a média de diversas observações de *flat-field*, normaliza-se a partir da interpolação dos dados por um polinômio e posteriormente os dados do objeto de ciência são divididos pelo *flat-field* normalizado, eliminando-se assim a variação pixel a pixel devido a diferentes eficiências dos elementos do CCD.

A calibração em comprimento de onda dos espectros é realizada utilizando-se observações de lâmpadas de calibração, que apresentam linhas de emissão com comprimentos de onda bem conhecidos. Para a banda J, a lâmpada utilizada foi uma lâmpada de argônio (Ar) e para a banda K, utilizou-se uma lâmpada de argônio-xenônio (ArXe). Durante o processamento dos dados, obtém-se a relação entre os comprimentos de onda das linhas de emissão presentes nos espectros das lâmpadas e aplica-se essa relação aos espectros da estrela padrão e da galáxia.

Exposições do céu são realizadas durante as observações dos dados. Foram realizadas 4 exposições do céu, movendo-se o telescópio em 30 segundos de arco em relação à galáxia. As observações do céu foram intercaladas com as observações de NGC 1125, seguindo o padrão NGC 1125-Céu-NGC 1125, de forma que para cada exposição da galáxia, há uma exposição de céu realizada temporalmente próxima à observação da mesma. Os dados resultantes das exposições de céu foram subtraídas dos dados das exposições da galáxia, utilizando-se sempre a observação do céu realizada ligeiramente antes ou depois da exposição da galáxia.

Os efeitos de curvaturas e distorções espaciais nas imagens são corrigidos utilizando-se imagens ronchi. Essas imagens são obtidas iluminando-se uma rede de dispersão localizada no plano focal do instrumento com a lâmpada de *flat-field*, produzindo-se nove traços espectrais para cada *slice*, os quais são utilizados para corrigir as distorções espaciais das imagens.

Quando observa-se um objeto astronômico utilizando-se telescópios terrestres, os dados obtidos são afetados pela passagem da radiação através da atmosfera terrestre. No infravermelho próximo a atmosfera produz diversas bandas de absorção nos espectros, as quais devem ser eliminadas, durante o processo de redução dos dados. Para fazer o cancelamento das absorções telúricas, observam-se estrelas padrão telúricas antes e após as observações do objeto de ciência. As estrelas devem estar localizadas próximas o bastante do objeto de ciência para minimizar diferenças na massa de ar da atmosfera entre a observação das estrelas e do objeto de ciência. Foram escolhidas estrelas do tipo A, para as quais somente as absorções das linhas do hidrogênio, Pa $\beta$  e Br $\gamma$ , são proemi-

nentes nas bandas J e K, respectivamente. Essas linhas são ajustadas e excluídas dos espectros das estrelas, os quais são normalizados (ajustado e dividido por um polinômio). O espectro normalizado contém somente as absorções telúricas, e ao dividir os espectros da galáxia pelo espectro normalizado, as absorções produzidas pela atmosfera terrestre são canceladas.

Os espectros das estrelas padrão telúricas também são utilizados para a calibração dos espectros em fluxo. Sabendo-se as magnitudes e tipo espectral da estrela, disponíveis na base de dados SIMBAD<sup>1</sup>, assume-se que o espectro é do tipo corpo negro e encontra-se a curva de sensibilidade, que é utilizada para converter os espectros da galáxia de contagem de fótons para unidades de fluxo ( $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$ ).

## 2.4 CUBO DE DADOS

Após o processo de redução dos dados, descrito acima, constrói-se cubos de dados para cada exposição individual da galáxia. Os cubos para as exposições individuais foram criados com pixels espaciais quadrados de  $0''.05 \times 0''.05$ . Os cubos de exposições individuais para cada banda foram combinados, realizando-se uma média e utilizando-se o pico do contínuo como referência, obtendo-se um cubo para cada banda de observação. Cada cubo contém cerca de  $61 \times 64$  pixels espaciais e 2040 pixels espectrais.

A resolução espectral dos cubos nas duas bandas corresponde a cerca de  $50 \text{ km s}^{-1}$ , estimada a partir da medida da largura a meia altura (FWHM) dos perfis de linhas de emissão típicas presentes nos espectros das lâmpadas de calibração em comprimento de onda. A resolução angular dos dados é  $\sim 0''.4$  em ambas as bandas, obtida a partir da medida da FWHM do perfil de brilho das estrelas padrão telúricas, observadas sob as mesmas condições das observações da galáxia.

O cubo de dados da banda K foi utilizado, recentemente em Riffel et al. (2021b), para mapear a distribuição de fluxos das linhas de emissão do  $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$  e  $\text{Br}\gamma$  e analisar os mecanismos de excitação do  $\text{H}_2$  em uma amostra de 36 AGNs observados com o NIFS, que inclui NGC 1125. Nesta dissertação apresenta-se uma análise detalhada da distribuição e cinemática do gás na região central de NGC 1125 e dessa forma não há sobreposição com o trabalho anterior, cujo objetivo foi obter resultados estatisticamente significativos para uma amostra maior de galáxias. Os dados da banda J são apresentados pela primeira vez neste trabalho.

<sup>1</sup>Base de dados astronômicos (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CINEMÁTICA ESTELAR

Os espectros de galáxias próximas apresentam diversas absorções estelares na banda K, sendo comumente as bandas do CO em  $\sim 2.30 \mu\text{m}$  as mais proeminentes (Riffel et al., 2015, 2019). A partir dos ajustes das absorções estelares, presentes nos espectros das galáxias, é possível obter medidas para a cinemática estelar. Neste trabalho, utiliza-se o método *penalized Pixel-Fitting* - pPXF (Cappellari; Emsellem, 2004; Cappellari, 2017) para obter a distribuição de velocidades ao longo da linha de visada (LOSVD - *Line-of-Sight Velocity Distribution*), a partir do ajuste das bandas do CO na banda K.

Basicamente, o pPXF gera um modelo para o espectro da galáxia ( $G_{\text{mod}}(x)$ ), combinando e convoluindo espectros templates que devem ser representativos das populações estelares presentes na galáxia ( $T(x)$ ) com a LOSVD. O procedimento é executado em espectros rebinados para uma escala  $x = \ln\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e a partir da minimização do  $\chi^2$ , obtendo-se assim os parâmetros que melhor representam a LOSVD. Sendo o espectro da galáxia  $G(x)$  para um conjunto de  $N$  pixels, o  $\chi^2$  é dado por:

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N r_n^2, \quad (3.1)$$

onde os resíduos são definidos como

$$r_n = \frac{G_{\text{mod}}(x_n) - G(x_n)}{\Delta G(x_n)}, \quad (3.2)$$

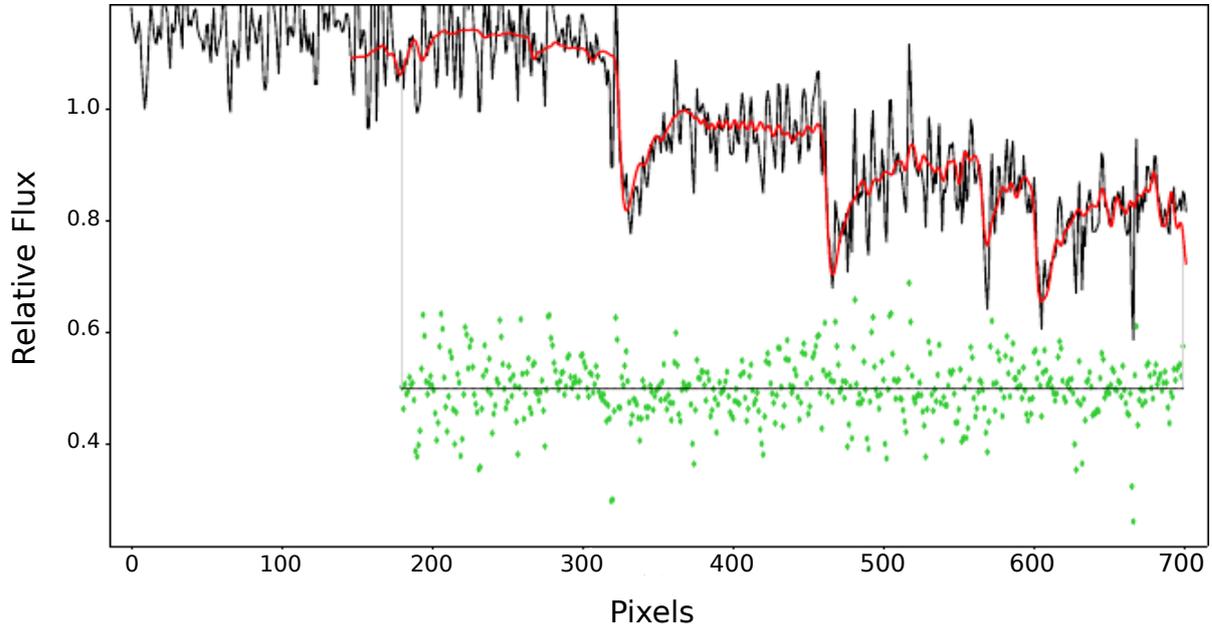
onde  $\Delta G(x_n)$  é o erro em  $G(x_n)$ .

O modelo que representa o espectro da galáxia é dado por:

$$G_{\text{mod}}(x) = \sum_{k=1}^K w_k [B * T_k](x) + \sum_{l=0}^L b_l P_l(x) \quad w_k \geq 0, \quad (3.3)$$

onde  $T_k$  é o template  $k$  da base de espectros templates,  $B(x) = L(cx)$  é a função de alargamento,  $L(v)$  é a LOSVD,  $v = cx$ ,  $c$  é o módulo da velocidade da luz, e o símbolo  $*$  significa convolução. As funções  $P_l(x)$  são polinômios de Legendre de ordem  $l$  e  $w_k$  são os pesos atribuídos a cada espectro template.

Figura 3.1 – Exemplos de ajustes das bandas de absorção do CO em  $\sim 2.30 \mu\text{m}$  para o *spaxel* nuclear, tomado como a posição coincidente com o pico da emissão contínua na banda K.



Assumindo-se que a LOSVD é descrita por séries de Gauss-Hermite, tem-se:

$$L(v) = \frac{e^{-(1/2)y^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[ 1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right], \quad (3.4)$$

onde  $H_m$  são os polinômios de Hermite,  $y = (v - V)/\sigma$ ,  $v = cx$ ,  $V$  é a velocidade radial,  $\sigma$  é a dispersão de velocidades e  $h_3, \dots, h_M$  são momentos de Gauss-Hermite de maiores ordens, que medem os desvios da LOSVD em relação a uma distribuição de velocidades gaussiana.

Neste trabalho, utiliza-se a versão *Python* do código pPXF disponibilizado pelo autor e descrita em Cappellari (2017). O pPXF permite o uso de vários espectros templates simultaneamente, os quais devem ser representativos das populações estelares que produzem as absorções que se deseja reproduzir. Utilizamos a base de espectros de estrelas do tipo tardio do Observatório Gemini (Winge; Riffel; Storchi-Bergmann, 2009; Diniz; Riffel, 2011). A base é composta por espectros de 29 estrelas observadas com a IFU do instrumento GNIRS (Winge; Riffel; Storchi-Bergmann, 2009) e 20 observadas com o instrumento NIFS (Diniz; Riffel, 2011), incluindo estrelas de tipos espectrais de F a M. As observações foram realizadas na banda K com uma resolução espectral de  $\sim 3.3 \text{ \AA}$ , similar à resolução dos espectros de NGC 1125. A Figura 3.1 apresenta um exemplo de ajuste, representado pela linha sólida vermelha, das bandas de absorção do CO em  $\sim 2.30 \mu\text{m}$  para o *spaxel* nuclear.

### 3.2 AJUSTES DOS PERFIS DAS LINHAS DE EMISSÃO

Os perfis das linhas de emissão mais intensas, observadas nos espectros das bandas J e K da galáxia NGC 1125, foram ajustados utilizando o pacote IFSCUBE (Ruschel-Dutra, 2020). Esse pacote foi desenvolvido na linguagem *Python* e permite ajustar os perfis das linhas de emissão por funções Gaussianas ou séries de Gauss-Hermite, utilizando-se uma ou mais funções para representar o perfil de cada linha de emissão.

Os perfis das linhas de emissão presentes nos espectros de NGC 1125 são ajustados primeiramente por séries de Gauss-Hermite, o que permite obter uma boa representação das observações na maioria das posições. Posteriormente, ajusta-se os perfis observados utilizando-se duas funções Gaussianas para cada linha de emissão, o que facilita a separação de diferentes componentes cinemáticas. As seguintes linhas de emissão são ajustadas: [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$ , [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ , Pa $\beta$   $\lambda 1.2822 \mu\text{m}$ , H<sub>2</sub>  $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$  e Br $\gamma$   $\lambda 2.16612 \mu\text{m}$ .

Os ajustes dos espectros das bandas J e K são realizados separadamente. Durante o ajuste, o contínuo é representado por uma função linear, já que o intervalo espectral ajustado é pequeno e não apresenta variações na forma do contínuo nos espectros observados. Usa-se o parâmetro *refit* do código IFSCUBE para usar os parâmetros de ajustes bem sucedidos de *spaxels* localizados a distâncias menores do que 0'.25 do *spaxel* considerado no ajuste. A rotina ajusta primeiramente o *spaxel* correspondente ao pico da emissão contínua, utilizando chutes iniciais para os parâmetros fornecidos pelo usuário e posteriormente ajusta os demais *spaxels* do cubo, seguindo um padrão espiral a partir do centro.

Na Figura 3.2 apresenta-se um exemplo de ajuste dos perfis das linhas de emissão do [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  e Pa $\beta$  por séries de Gauss-Hermite para o espectro correspondente à posição do pico da emissão contínua, obtido com a rotina *fit\_scrutinizer* do pacote IFSCUBE. No painel superior, o espectro observado é mostrado em azul e o ajuste em preto. No painel inferior, mostra-se os resíduos do ajuste normalizados pelo ruído do espectro. Um exemplo de ajuste das mesmas linhas e mesma posição, obtido usando-se duas curvas Gaussianas é mostrado na Figura 3.3. Exemplos de ajustes para as linhas H<sub>2</sub>  $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$  e Br $\gamma$  por séries de Gauss-Hermite e por duas funções Gaussianas são mostradas nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente.

### 3.3 MODELO DE DISCO EM ROTAÇÃO

Com o objetivo de reproduzir os campos de velocidades observados para as estrelas e para o H<sub>2</sub>, estes foram ajustados por um modelo de disco em rotação. Utilizamos o modelo analítico apresentado em Bertola et al. (1991), o qual assume órbitas circulares no

Figura 3.2 – Exemplos de ajustes dos perfis das linhas de emissão do  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}$  e  $\text{Pa}\beta \lambda 1.2822 \mu\text{m}$  por séries de Gauss-Hermite para o espectro nuclear.

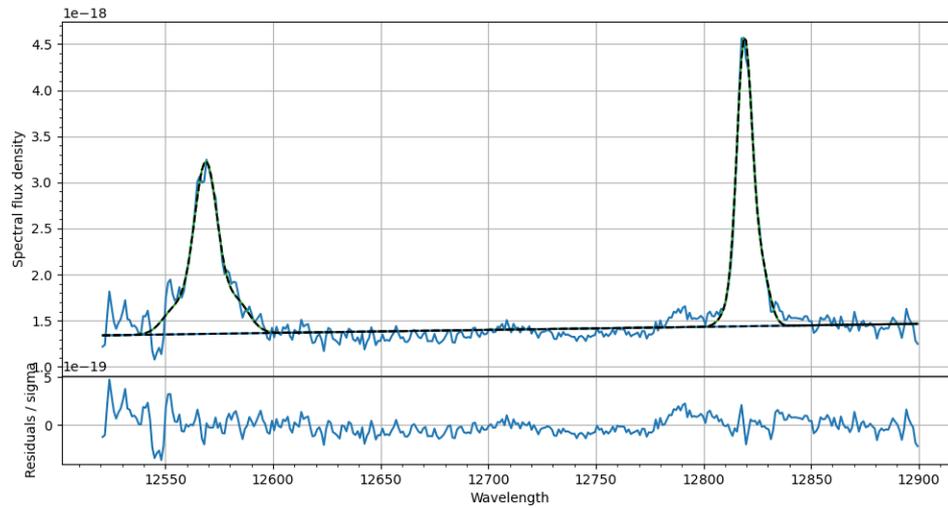


Figura 3.3 – Exemplos de ajustes dos perfis das linhas de emissão do  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}$  e  $\text{Pa}\beta \lambda 1.2822 \mu\text{m}$  por duas funções Gaussianas por linha, para o espectro nuclear.

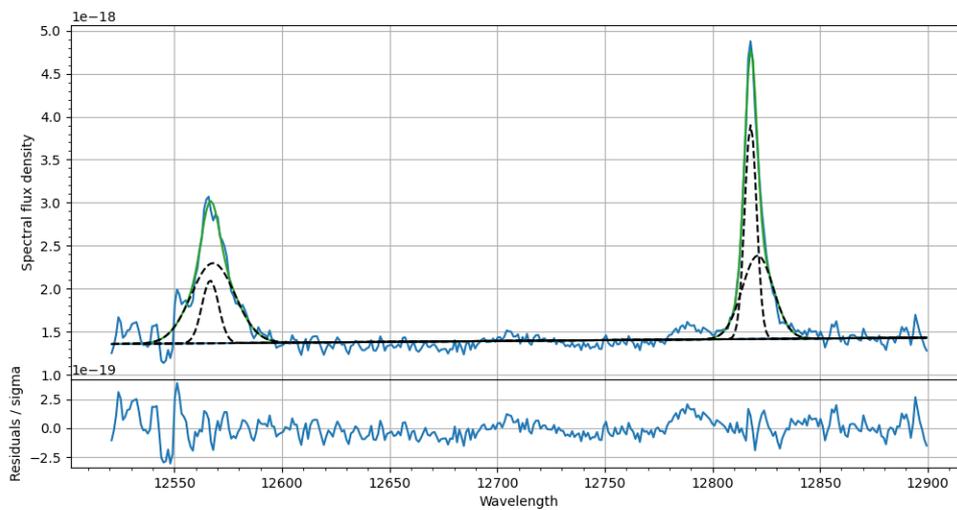


Figura 3.4 – Exemplos de ajustes dos perfis das linhas de emissão do  $\text{H}_2$   $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$  e  $\text{Br}\gamma$   $\lambda 2.16612 \mu\text{m}$  por séries de Gauss-Hermite para o espectro nuclear.

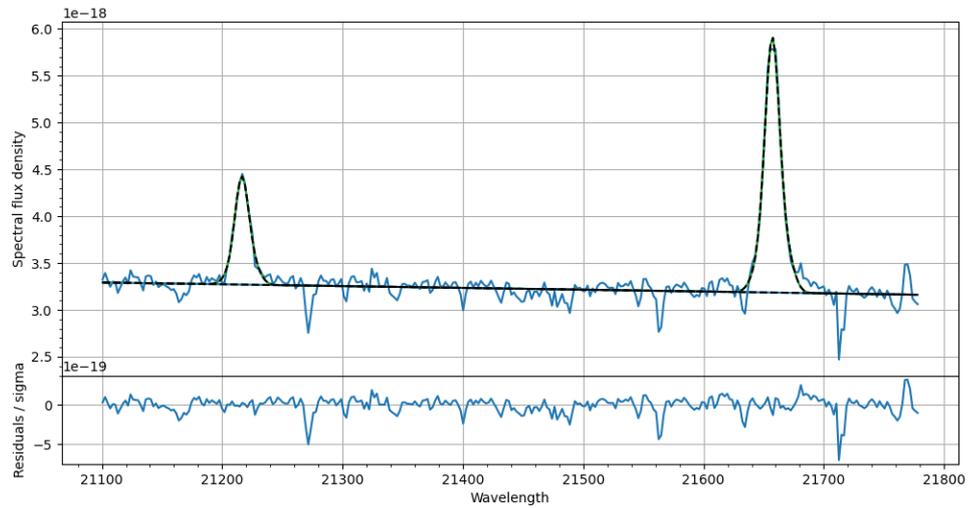
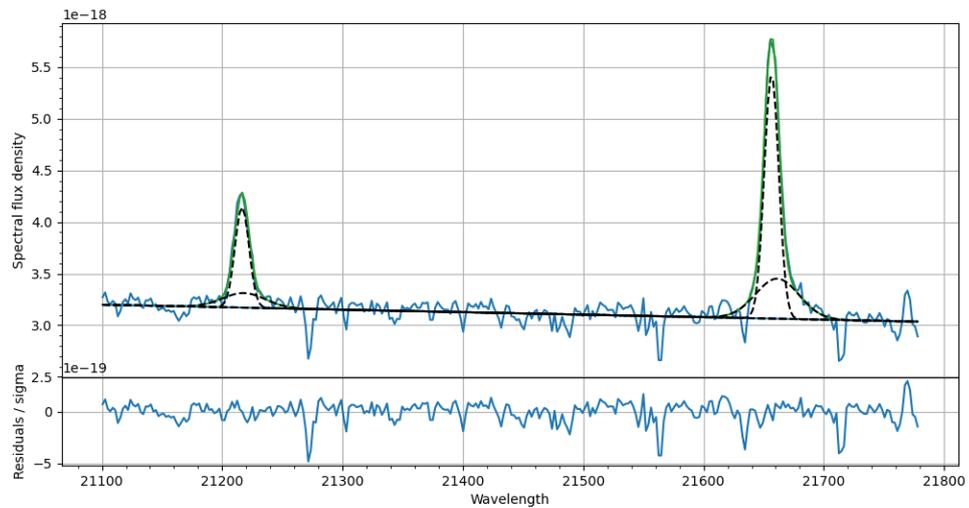


Figura 3.5 – Exemplos de ajustes dos perfis das linhas de emissão do  $\text{H}_2$   $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$  e  $\text{Br}\gamma$   $\lambda 2.16612 \mu\text{m}$  por duas funções Gaussianas por linha, para o espectro nuclear.



plano do disco da galáxia, com velocidade ao longo da linha de visada dada por

$$V_{\text{mod}}(R, \Psi) = V_s + \frac{AR \cos(\Psi - \Psi_0) \sin(i) \cos^p(i)}{\{R^2[\sin^2(\Psi - \Psi_0) + \cos^2(i) \cos^2(\Psi - \Psi_0)] + C_0^2 \cos^2(i)\}^{p/2}}, \quad (3.5)$$

onde  $R$  é a distância ao núcleo projetada no plano do céu com o ângulo de posição  $\Psi$  correspondente,  $V_s$  é a velocidade sistêmica da galáxia,  $A$  é a amplitude da curva de rotação,  $i$  é a inclinação do disco em relação ao plano do céu ( $i = 0$  para um disco *face on* e  $i = 90^\circ$  para um disco *edge on*),  $\Psi_0$  é o ângulo de posição da linha dos nodos,  $p$  mede a inclinação da curva de rotação e tem valores entre 1 e 1.5, e  $C_0$  é um parâmetro de concentração, que mede a posição onde a curva de rotação atinge a velocidade que é 70% da velocidade máxima.

## 4 RESULTADOS

A Figura 4.1 apresenta, no painel superior esquerdo, uma imagem em grande escala na banda g da galáxia NGC 1125, obtida com dos dados do telescópio Pan-STARRS1 (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)<sup>1</sup>. O painel superior direito da mesma figura mostra a imagem na banda K através do cubo de dados do NIFS, a partir do cálculo da média dos fluxos do contínuo no intervalo espectral entre 2.24 – 2.27  $\mu\text{m}$ . Observa-se uma boa correspondência entre a emissão do contínuo na banda K e o contínuo no visível.

Os painéis central e inferior da Figura 4.1 mostram os espectros das bandas J e K para o *spaxel* correspondente ao pico do contínuo (o núcleo da galáxia), respectivamente. Os espectros mostram linhas intensas do [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ , de recombinação do hidrogênio ( $\text{Pa}\beta$  e  $\text{Br}\gamma$ ) e do hidrogênio molecular (em 2.1218  $\mu\text{m}$ ). Estas linhas foram identificadas nos espectros, juntamente com a linha de [P II] em 1.1886  $\mu\text{m}$ , que também é utilizada neste trabalho.

Nas seções a seguir, apresentam-se os resultados obtidos para a cinemática estelar, distribuição de fluxos e cinemática do gás ionizado e molecular. As linhas de emissão são ajustadas por séries de Gauss-Hermite e por duas componentes gaussianas. Os parâmetros resultantes dos perfis das linhas por séries de Gauss-Hermite serão utilizados para analisar a origem da emissão das linhas de emissão, mapear a extinção do gás e para realizar uma análise preliminar da cinemática do gás. Já os resultados dos ajustes dos perfis por duas componentes Gaussianas serão utilizados em uma análise mais detalhada da cinemática do gás.

### 4.1 CINEMÁTICA ESTELAR

Na figura 4.2, apresenta-se os mapas para a velocidade ( $V_*$ ), dispersão de velocidades ( $\sigma_*$ ), momentos  $h_{3*}$  e  $h_{4*}$ , obtidos a partir do ajuste das bandas do CO na banda K utilizando o código pPXF (Cappellari, 2017), conforme descrito no capítulo anterior. Em todos os mapas, a cruz central representa a posição do pico do contínuo na banda K e as regiões em cinza correspondem a *spaxels* onde a razão sinal-ruído dos espectros é muito baixa para possibilitar bons ajustes das absorções do CO. Nessas regiões as incertezas em  $V_*$  e  $\sigma_*$  são superiores a 25  $\text{km s}^{-1}$ .

O campo de velocidades estelar de NGC 1125 (painel superior esquerdo da Fig. 4.2) apresenta um padrão de disco em rotação característico, com *redshifts* observados a su-

---

<sup>1</sup><https://panstarrs.stsci.edu/>.

Figura 4.1 – Imagem em grande escala (na banda g) da galáxia NGC 1125 (superior esquerdo) extraída de <https://ps1images.stsci.edu/cgi-bin/ps1cutouts>, imagem do contínuo na banda K centrado em  $2.25 \mu\text{m}$  (superior direito), obtido pela média da emissão no intervalo espectral de  $300 \text{ \AA}$ . Os painéis central e inferior mostram exemplos de espectros (corrigidos por efeito *Doppler*) nas bandas J e K para o *spaxel* correspondente ao pico do contínuo, com as principais linhas de emissão identificadas.

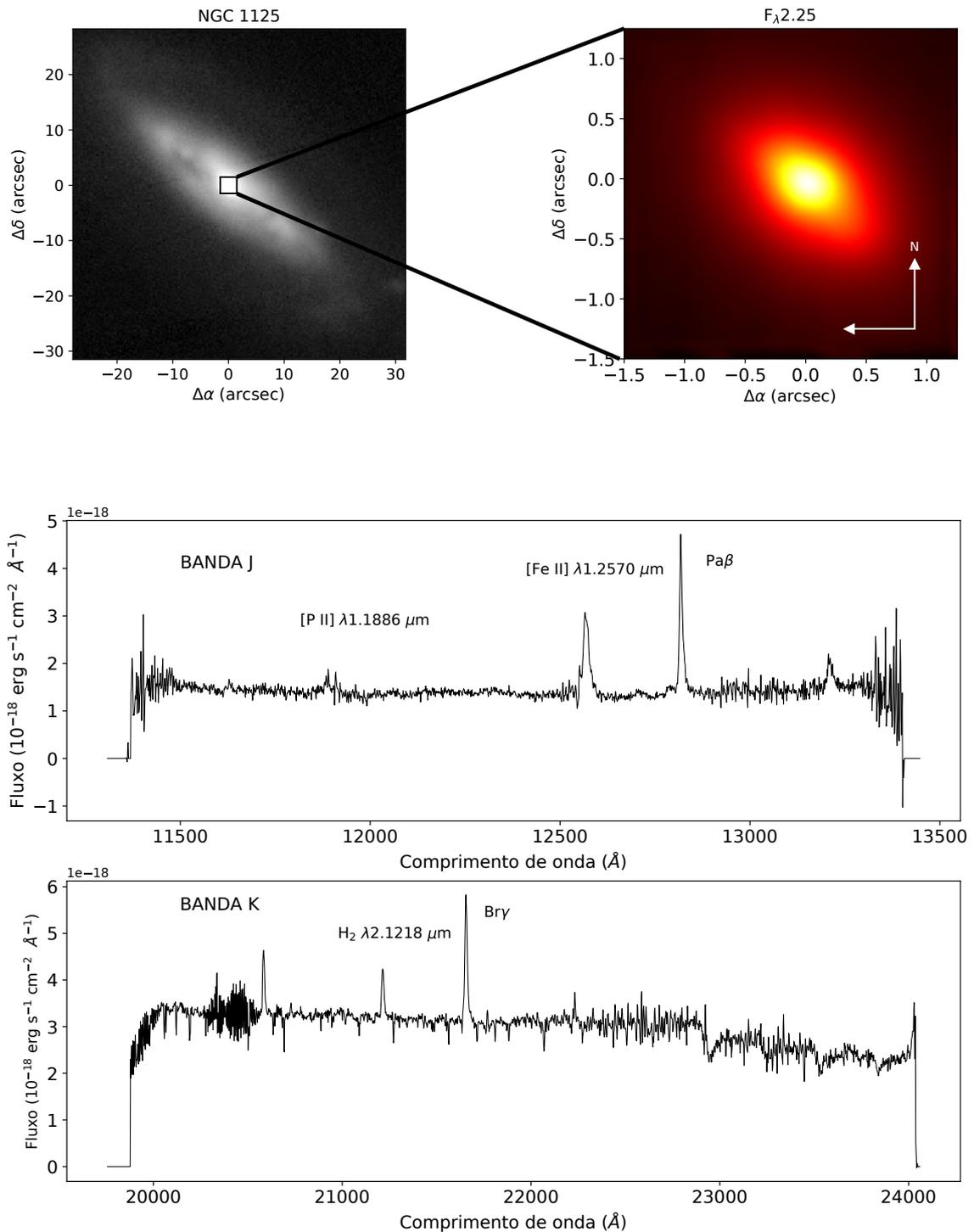
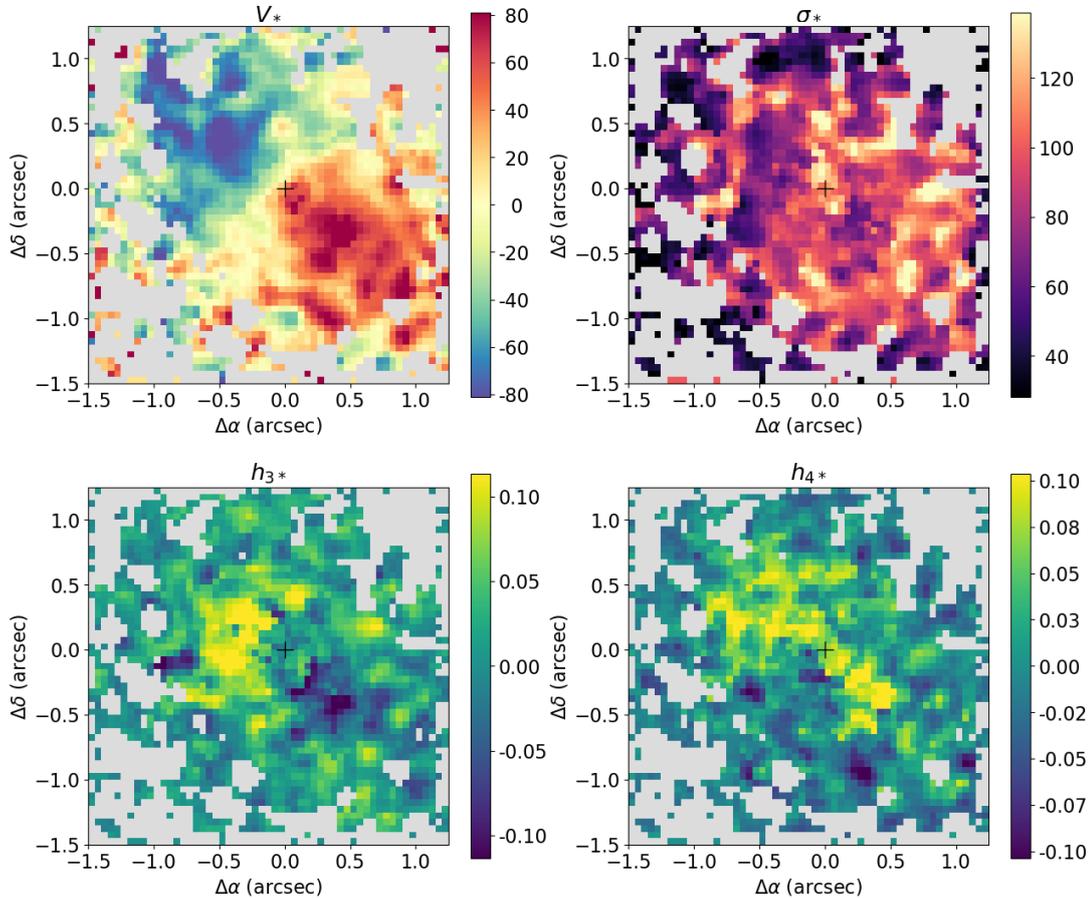


Figura 4.2 – Medidas da cinemática estelar em NGC 1125: campo de velocidades (superior esquerdo), dispersão de velocidades (superio direito), momentos  $h_3$  (inferior esquerdo) e  $h_4$  (inferior direito).



doeste e *blueshifts* a nordeste do núcleo. A velocidade sistêmica da galáxia, obtida a partir do modelo de disco em rotação que será apresentado no próximo capítulo, foi subtraído do campo de velocidades apresentado. A amplitude da curva de rotação é de  $\sim 80 \text{ km s}^{-1}$ , como pode ser visto na figura.

O mapa de dispersão de velocidades (painel superior direito da Figura 4.2) apresenta valores entre  $\sim 40$  e  $\sim 120 \text{ km s}^{-1}$ , com os maiores valores observados em regiões próximas do núcleo e menores valores observados em regiões mais distantes do mesmo, formando estruturas de baixos valores de  $\sigma_*$ , possivelmente originados por populações estelares mais jovens do que as populações estelares típicas do bojo de NGC 1125, assim como observado em outras galáxias ativas próximas (Riffel et al., 2017).

Os mapas de  $h_{3*}$  e  $h_{4*}$  (painéis inferiores da Figura 4.2) mostram regiões onde há desvios assimétricos (mapa de  $h_{3*}$ ) e simétricos (mapa de  $h_{4*}$ ) do perfil velocidades observado em relação a uma distribuição gaussiana. Regiões onde  $h_{3*} > 0$  indicam a presença de asas vermelhas na distribuição de velocidades em relação à linha de visada (LOSVD), e regiões onde  $h_{3*} < 0$  revelam a presença de asas azuis na LOSVD. Já o parâmetro  $h_{4*}$  quantifica desvios simétricos da LOSVD em relação a uma distribuição gaussiana, com

$h_{4*} > 0$  para uma distribuição de velocidades mais “pontaguda” do que uma gaussiana e  $h_{4*} < 0$  para uma distribuição mais alargada do que uma função gaussiana (Riffel, 2010).

O mapa para o momento  $h_{3*}$  apresenta principalmente valores positivos para nordeste do núcleo e valores negativos para sudoeste do mesmo. Os maiores valores (positivos) são observados em regiões onde o campo de velocidades estelar apresenta os maiores *blueshifts*, enquanto que os menores valores (negativos) são vistos onde o campo de velocidades apresenta *redshifts*. O mapa para o momento  $h_{4*}$  mostra que os maiores valores (positivos) são observados aproximadamente co-espacialmente com os menores valores de dispersão de velocidades estelar.

## 4.2 AJUSTES DOS PERFIS POR SÉRIES DE GAUSS-HERMITE

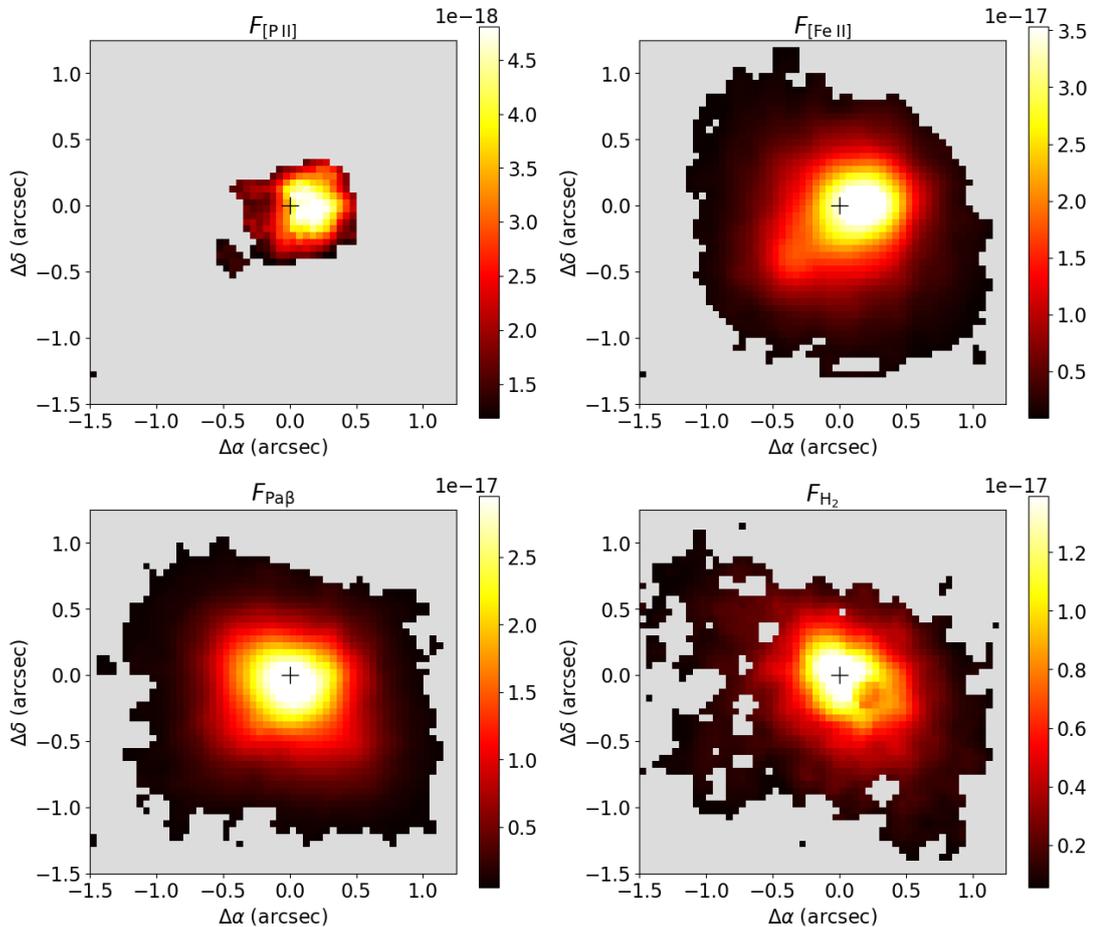
Nesta seção são apresentados mapas dos parâmetros físicos medidos a partir do ajuste das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite. Em cada mapa, é apresentada uma cruz na região central coincidente com o pico da emissão contínua, tomado como a posição nuclear. Regiões em cinza nos mapas correspondem a posições onde as linhas de emissão não foram detectadas, utilizando-se o critério de detecção de que a amplitude da linha deve ser maior do que 3 vezes o desvio padrão do espectro em uma região próxima à linha considerada, livre de outras linhas de emissão.

A Figura 4.3 apresenta as distribuições de fluxos para [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$  (canto superior esquerdo), [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (canto superior direito), Pa $\beta$  (canto inferior esquerdo) e H<sub>2</sub>  $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$  (canto inferior direito), obtidas por séries de Gauss-Hermite. A barra lateral nos mapas indica os valores de fluxos em unidades de  $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ . Para todos os mapas, observa-se que os maiores valores de fluxo ocorrem no núcleo, estendendo-se até  $\approx 0''.5$  desta posição. A emissão observada para as linhas do [Fe II], Pa $\beta$  e H<sub>2</sub> são mais espalhadas pelo campo de visão, em todos os casos com emissão observada até as bordas do campo de visão NIFS. Já para a linha do [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$  a emissão é restrita à região nuclear.

A comparação entre os mapas de fluxos da Figura 4.3 revela algumas diferenças para as distintas linhas. O pico da emissão para as linhas do [P II] e [Fe II] está deslocado em aproximadamente  $0''.3$  para leste do núcleo, enquanto que para as outras duas linhas, o pico de emissão ocorre no núcleo da galáxia. Embora os mapas de fluxos para as linhas [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$ , Pa $\beta$  e H<sub>2</sub>  $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$  apresentem a maior extensão ao longo do eixo maior da galáxia (direção nordeste-sudoeste), o mapa de fluxo para o [Fe II] apresenta os maiores valores em uma estrutura aproximadamente perpendicular ao disco. Essa estrutura também parece estar presente no mapa de fluxo do Pa $\beta$ , porém parcialmente ofuscada pela emissão do gás no disco.

Os painéis da Figura 4.4 mostram os campos de velocidades do gás para as di-

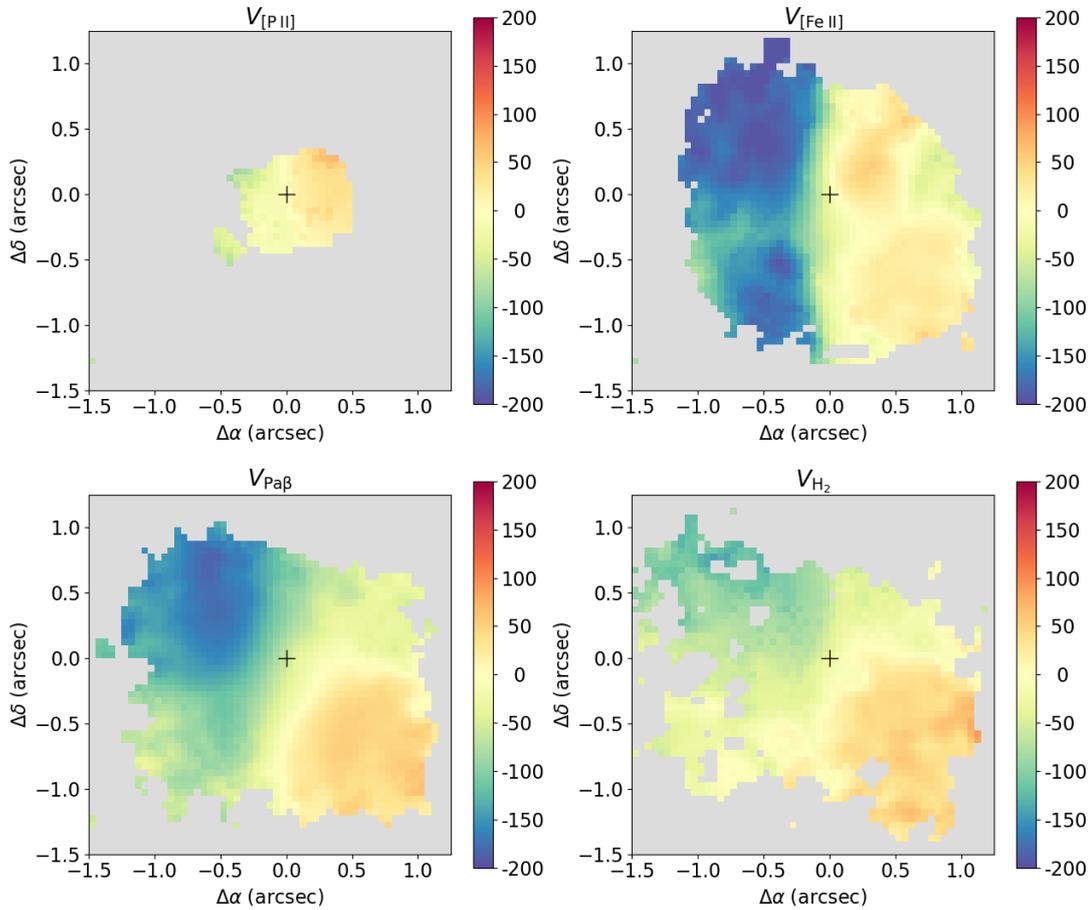
Figura 4.3 – Mapas de distribuição de fluxo obtidas pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas do [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$  (superior esquerdo), [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (superior direito), Pa $\beta$  (inferior esquerdo) e H<sub>2</sub> (inferior direito).



ferentes linhas de emissão. Os valores de velocidade estão em unidades de  $\text{km s}^{-1}$  e a velocidade sistêmica da galáxia, obtida a partir do ajuste do campo de velocidades estelar por um modelo de disco em rotação, foi subtraída das velocidades observadas. A distribuição de velocidades observada para todos os mapas apresentam estruturas em *redshift* ao sudoeste do núcleo e estruturas em *blueshift* a nordeste do mesmo, sugerindo uma componente do gás em rotação, com um padrão semelhante ao das estrelas. Para os mapas do [Fe II] (canto superior direito) e Pa $\beta$  (canto inferior direito), as amplitudes de velocidade chegam a  $\approx 200 \text{ km s}^{-1}$  em alguns locais contendo estruturas em *blueshift*, enquanto que as estruturas em *redshift* apresentam amplitudes de  $\approx 100 \text{ km s}^{-1}$ . O campo de velocidades para a linha do [P II] (canto superior esquerdo) exibe amplitudes de  $\approx 50 \text{ km s}^{-1}$ , porém essa linha é detectada somente na região central. Já o mapa para a linha do H<sub>2</sub> (canto inferior direito) observa-se que as amplitudes de velocidade alcançam  $\approx 100 \text{ km s}^{-1}$ , semelhante ao observado para as estrelas.

Além das amplitudes de velocidades diferentes entre as linhas de emissão, observa-se também estruturas distintas em seus campos de velocidades. A diferença mais visível

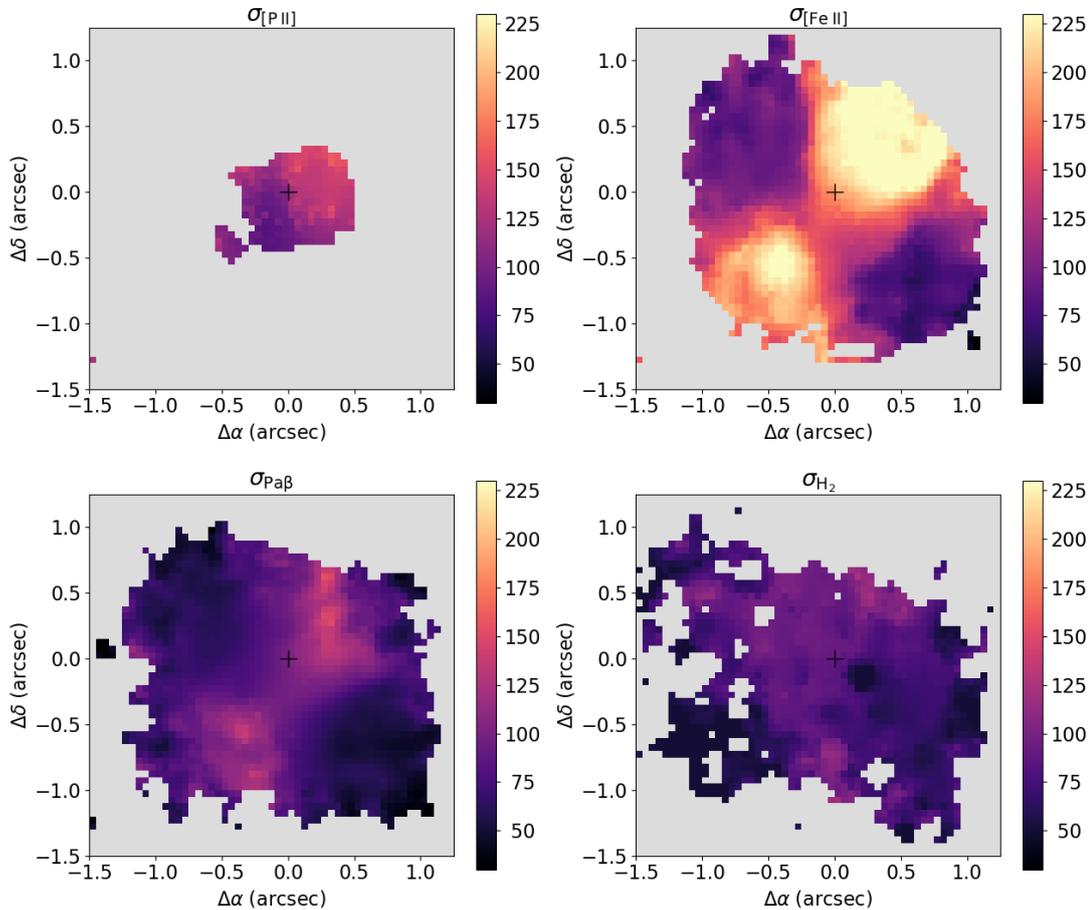
Figura 4.4 – Mapas de campo de velocidades obtidos pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas de emissão do [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$  (superior esquerdo), [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (superior direito), Pa $\beta$  (inferior esquerdo) e H<sub>2</sub> (inferior direito).



entre os campos de velocidades para o gás ionizado e molecular é uma estrutura em *blueshift* para sudeste do núcleo, que é observada nos campos de velocidades do gás ionizado (mais claramente visto para o [Fe II]) e está ausente para o H<sub>2</sub>. No lado oposto, ou seja, a noroeste do núcleo, há uma estrutura em *redshift* vista nos campos de velocidades do gás ionizado. Os *blueshifts* para sudeste e *redshifts* para o noroeste do núcleo são observados na mesma orientação dos níveis de maiores fluxos observados para o [Fe II], mencionado acima, e possivelmente são originados por um *outflow* de gás ionizado.

Os mapas para a dispersão de velocidades do gás são apresentados na Figura 4.5, em unidades de  $\text{km s}^{-1}$ . Os valores de  $\sigma$  para a linha do [P II] (canto superior esquerdo) são levemente maiores a oeste do núcleo, chegando a  $\approx 150 \text{ km s}^{-1}$ . Para a linha do [Fe II], o mapa de dispersão de velocidades mostra uma estrutura alongada na direção do ângulo de posição  $\text{PA} \sim 135^\circ$  (perpendicular ao disco da galáxia), onde encontra-se os maiores valores de  $\sigma$ , alcançando  $\approx 225 \text{ km s}^{-1}$ . Um mesmo padrão alongado é observado para o mapa de  $\sigma$  para a linha do Pa $\beta$ , com algumas regiões que vão de  $\approx 125\text{--}175 \text{ km s}^{-1}$ . O mapa de  $\sigma$  para a linha do H<sub>2</sub> é praticamente homogêneo em sua extensão, com valores típicos de  $\approx 125 \text{ km s}^{-1}$ . Assim como os *blueshifts* para sudeste e *redshifts* para noroeste

Figura 4.5 – Mapas de dispersão de velocidades obtidos pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas de emissão do [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$  (superior esquerdo), [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (superior direito), Pa $\beta$  (inferior esquerdo) e H<sub>2</sub> (inferior direito).

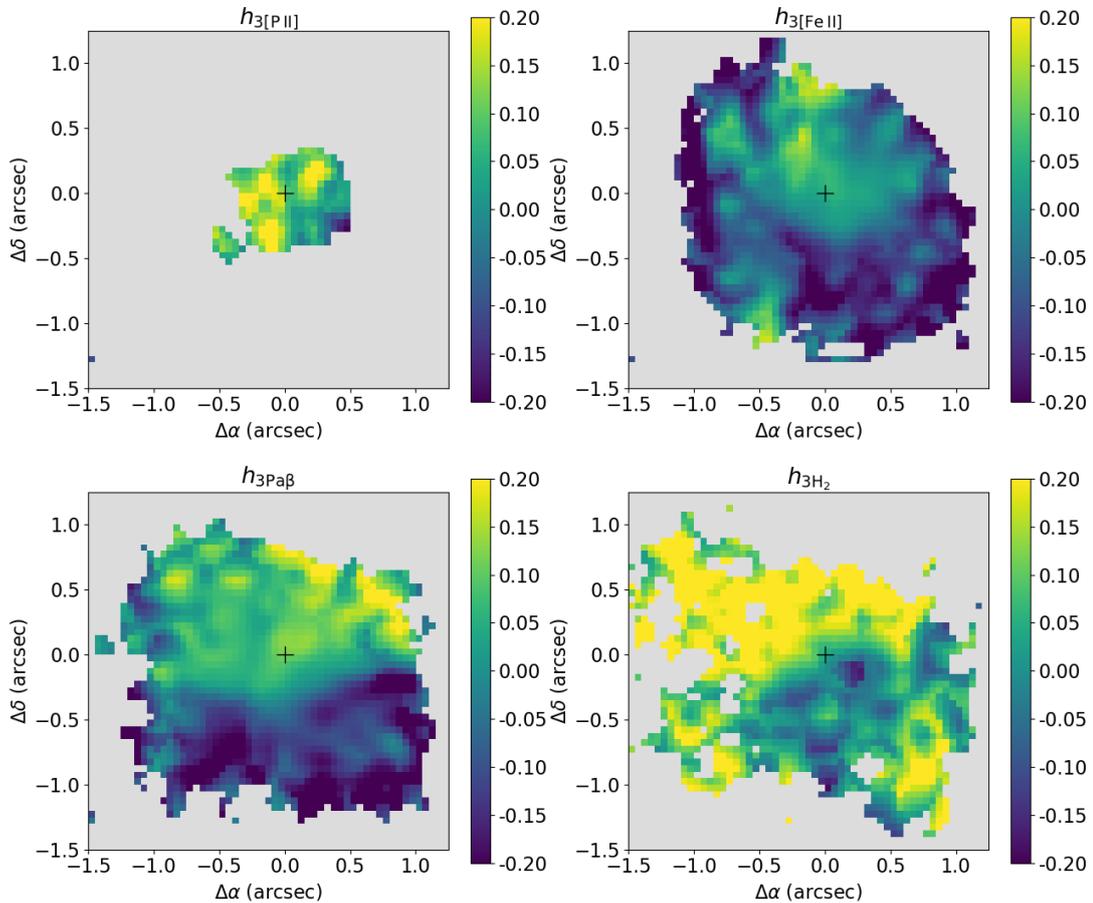


do núcleo, vistos nos campos de velocidades do gás ionizado, o aumento da dispersão de velocidades do gás na mesma região é esperada para um gás em *outflow*.

Na Figura 4.6, os painéis mostram os mapas para o momento de Gauss-Hermite  $h_3$  para as diferentes linhas de emissão. O mapa para a linha do [P II] mostra regiões próximas ao núcleo com picos no valor de  $h_3$ , chegando a  $\approx 0.2$ . Já para a linha do [Fe II], a distribuição espacial é mais espalhada pelo campo de visão. Há uma estrutura extensa ao norte que engloba a região nuclear com valores que vão  $\approx 0.05$ – $0.2$ . O mapa para Pa $\beta$  apresenta valores positivos ao norte do núcleo e valores negativos ao sul, onde o módulo de  $h_3$  chega a 0.2 em algumas regiões. Já o mapa para a linha do H<sub>2</sub> observa-se uma grande região ao norte do núcleo com valores intensos e positivos de  $h_3$ , enquanto que ao centro há valores menores. O parâmetro  $h_3$  mede desvios assimétricos dos perfis das linhas de emissão observadas em relação a uma função Gaussiana, e assim, os altos valores absolutos observados para as diferentes linhas de emissão indicam que seus perfis possuem asas assimétricas, as quais são claramente observadas em uma análise visual dos espectros.

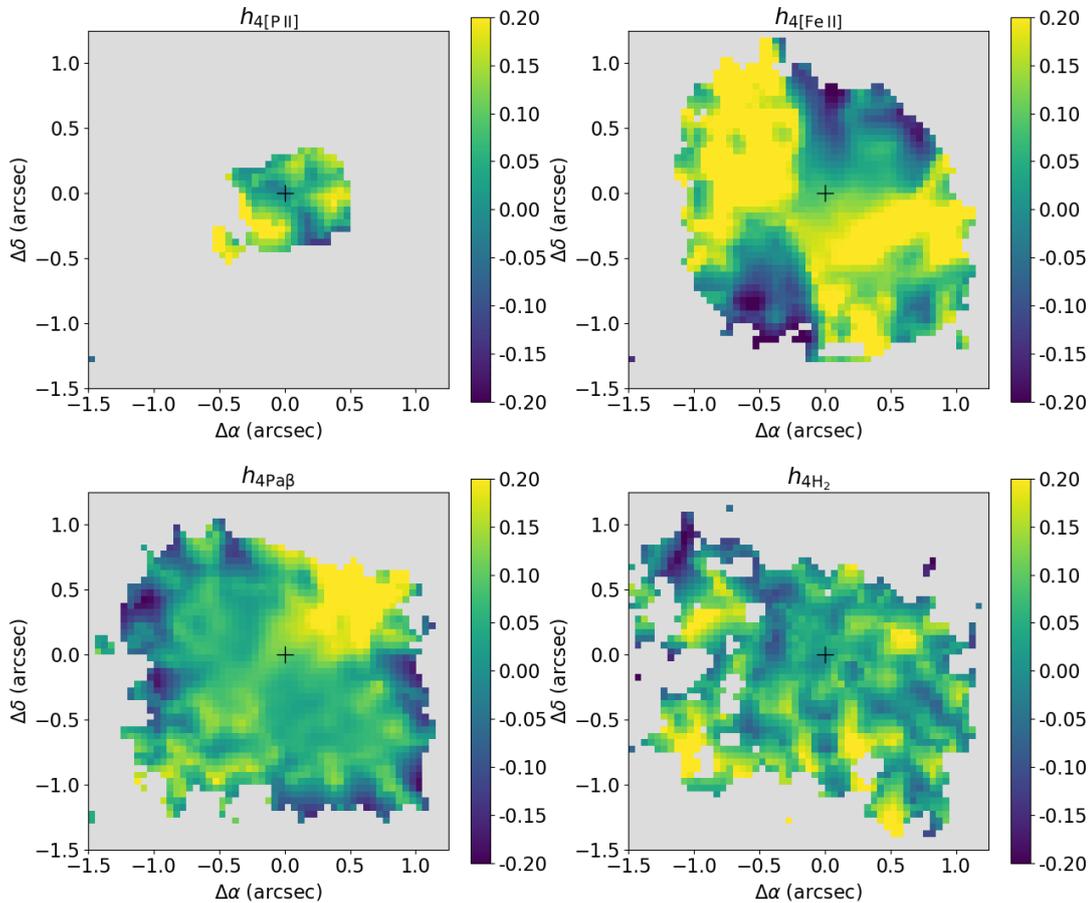
Já a Figura 4.7 contém os painéis para o momento de Gauss-Hermite  $h_4$ . Valores

Figura 4.6 – Mapas de  $h_3$  obtidos pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas de emissão do [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$  (superior esquerdo), [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (superior direito), Pa $\beta$  (inferior esquerdo) e H $_2$  (inferior direito).



entre  $-0.2$  e  $+0.2$  são observados para todas as linhas de emissão. Para todas as linhas, os valores positivos são observados principalmente para norte e noroeste do núcleo, enquanto que valores negativos estão o sul do núcleo. Se  $h_3 = h_4 = 0$ , a série de Gauss-Hermite se reduz a uma função Gaussiana, assim, os valores altos observados para  $h_3$  e  $h_4$  para todas as linhas de emissão indicam que mais do que uma componente cinemática está presente no gás emissor dessas linhas. Na próxima seção serão apresentados os resultados obtidos do ajuste das linhas de emissão por duas curvas Gaussianas, o que possibilita separar as componentes cinemáticas presentes em NGC 1125.

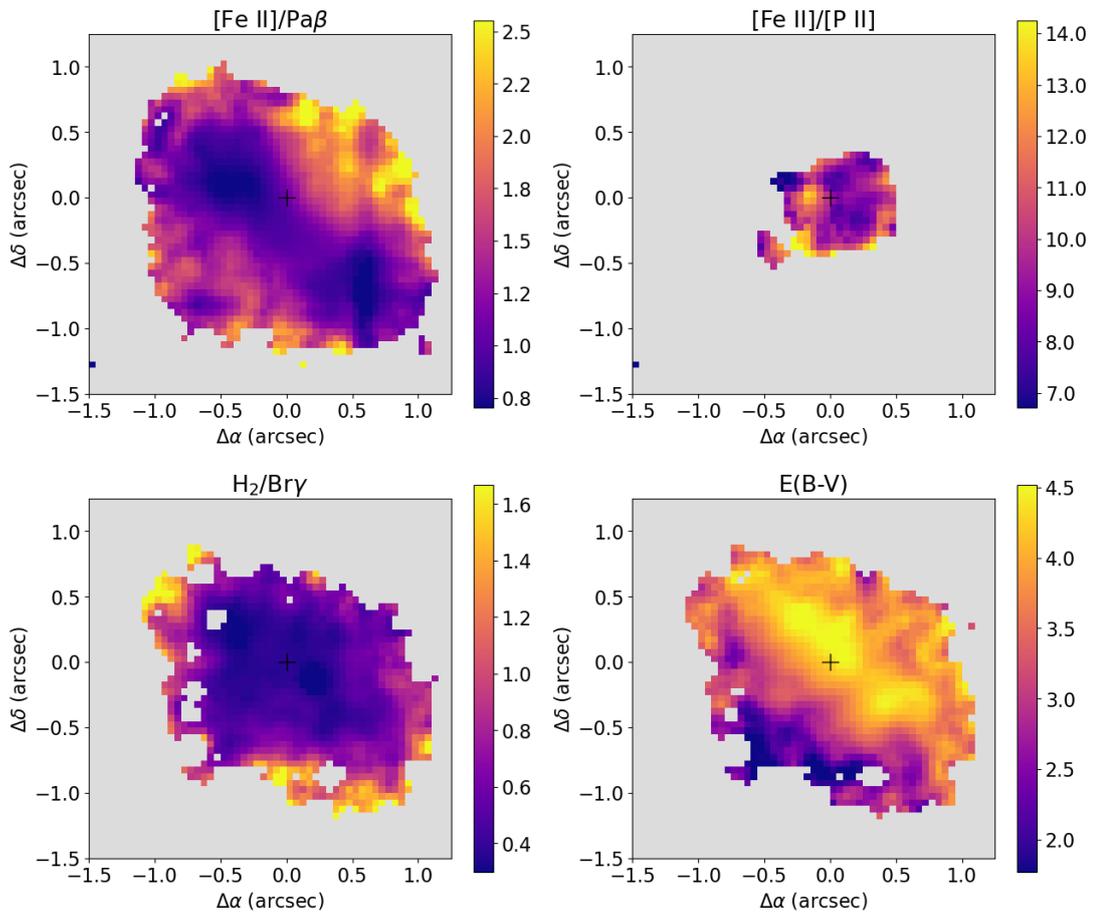
Figura 4.7 – Mapas de  $h_4$  obtidos pelo ajuste dos perfis por séries de Gauss-Hermite para as linhas de emissão do [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$  (superior esquerdo), [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (superior direito), Pa $\beta$  (inferior esquerdo) e H<sub>2</sub> (inferior direito).



Razões entre as intensidades das linhas de emissão podem ser utilizadas para estudar a excitação e a extinção do gás. Utilizamos os fluxos medidos a partir dos ajustes dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite para construir os mapas de razões de linhas apresentados na Figura 4.8. A razão [Fe II]/Pa $\beta$  possui uma estrutura extensa a nordeste e a sudoeste do núcleo seguindo a orientação do disco da galáxia, com valores entre 0.8–1.0. Os maiores valores são vistos principalmente a noroeste e a sudeste, chegando a 2.5, co-espacial com a estrutura de emissão vista nos mapas de fluxos, com as distorções nos campos de velocidades e com os maiores valores de dispersão de velocidades do gás ionizado. Já a razão [Fe II]/[P II] apresenta pequenas estruturas onde o valor varia entre 8.0–14, porém a linha do [P II] é detectada somente na região interna a  $0''.5$  do núcleo. O mapa de H<sub>2</sub>/Br $\gamma$  é praticamente homogêneo na região central, onde há os valores mais baixos, que variam entre 0.4–0.8. Esta razão aumenta com a distância ao núcleo, atingindo valores máximos de  $\sim 1.6$ .

A razão entre as intensidades das linhas de recombinação do hidrogênio, Br $\gamma$  e Pa $\beta$ , pode ser utilizada para estudar a extinção do gás e calcular o excesso de cor  $E(B - V)$ , a

Figura 4.8 – Mapas de razões de fluxo [Fe II]/Pa $\beta$  (superior esquerdo), [Fe II]/[P II] (superior direito), H<sub>2</sub>/Br $\gamma$  (inferior esquerdo) e mapa de excesso de cor  $E(B - V)$  (inferior direito).



partir da seguinte equação (Diniz et al., 2019):

$$E(B - V) = 4.74 \log \left( \frac{5.88}{F_{Pa\beta}/F_{Br\gamma}} \right), \quad (4.1)$$

onde  $F_{Pa\beta}$  e  $F_{Br\gamma}$  são os fluxos observados das linhas Pa $\beta$  e Br $\gamma$ , respectivamente. A derivação desta equação assume a lei de extinção de Cardelli, Clayton e Mathis (1989) e a razão teórica entre as intensidades das linhas de  $F_{Pa\beta}/F_{Br\gamma} = 5.88$ , correspondente ao caso B no limite de baixa densidade e uma temperatura eletrônica de 10000 K (Osterbrock; Ferland, 2006). O mapa de  $E(B - V)$  para NGC 1125 é mostrado no painel inferior direito da Figura 4.8. Valores entre 2 e 4.5 mag são observados, com os maiores valores observados ao longo do eixo maior da galáxia e para noroeste do núcleo, enquanto que os menores valores são observados para sudeste do núcleo.

### 4.3 AJUSTES DOS PERFIS POR DUAS GAUSSIANAS

Como mencionado na seção anterior, os perfis das linhas de emissão na região central de NGC 1125 apresentam desvios de curvas Gaussianas, o que indica a presença de mais de uma componente cinemática no gás emissor. Em particular, o gás ionizado apresenta uma estrutura de emissão observada perpendicularmente ao eixo maior da galáxia, a qual deve estar associada ao cone de ionização do AGN e possivelmente traçando *outflows* de gás ionizado. Com o objetivo de isolar as componentes do disco e do possível *outflow*, ajustamos os perfis das linhas de emissão usando duas funções gaussianas para cada linha. Os mapas provenientes desses ajustes são apresentados nessa seção. Assim como para os mapas resultantes do ajuste dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite, as regiões em cinza nos mapas são regiões mascaradas, onde a componente da linha não é detectada acima de 3 vezes o nível de ruído dos espectros. A cruz central mostra a posição do núcleo, os fluxos são mostrados em unidades de  $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ , as velocidades em  $\text{km s}^{-1}$  em relação à velocidade sistêmica da galáxia e as dispersões de velocidades em unidades de  $\text{km s}^{-1}$ . São mostrados os mapas para as linhas de emissão do  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}$ ,  $\text{Pa}\beta$  e  $\text{H}_2$ , que são as mais intensas observadas nas bandas J e K.

A Figura 4.9 mostra os mapas de fluxos para as duas componentes de cada linha de emissão, separadas pela largura da linha, as quais serão referidas como componente estreita e componente larga. Os painéis superiores da mesma figura mostram as distribuições de fluxos da componente estreita das linhas e os resultados para a componente larga das linhas são mostrados nos painéis inferiores. Os mapas de fluxos da componente estreita para todas as linhas são semelhantes, sendo mais estendidos ao longo do eixo maior da galáxia (nordeste-sudoeste), o que indica que a componente estreita traça a emissão de gás localizado no disco da galáxia. Já os mapas de fluxos para a componente larga das linhas de do  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}$  e  $\text{Pa}\beta$  apresentam uma estrutura bipolar, orientada na direção perpendicular ao eixo maior da galáxia, traçando a emissão de gás ionizado pelo AGN central. Para o  $\text{H}_2$ , a componente larga é detectada somente no núcleo da galáxia.

A Figura 4.4 apresenta os campos de velocidades para as componentes estreitas e largas das linhas. Os painéis superiores da figura mostram estruturas em *blueshift* à nordeste e *redshift* a sudoeste do mesmo, evidenciando um padrão de rotação semelhante ao do campo de velocidades estelar. Os mapas de velocidades para a componente larga das linhas do gás ionizado apresentam *blueshifts* a noroeste e *redshifts* a sudeste do núcleo, consistente com a presença de um *outflow* de gás ionizado, perpendicularmente ao eixo maior da galáxia. A velocidade observada para a componente larga do  $\text{H}_2$  é aproximadamente zero em todos os *spaxels* em que ela está detectada.

Na Figura 4.11, mostra-se os mapas de  $\sigma$  para ambas as componentes largas e estreitas. Os mapas superiores, correspondentes à componente estreita, mostram que os maiores valores de  $\sigma$ , na região central, não ultrapassam  $100 \text{ km s}^{-1}$ . O padrão observado

Figura 4.9 – Mapas de distribuição de fluxo para a componente estreita (painéis superiores) e larga (painéis inferiores) das linhas do  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (à esquerda),  $\text{Pa}\beta$  (ao centro) e  $\text{H}_2$  (à direita).

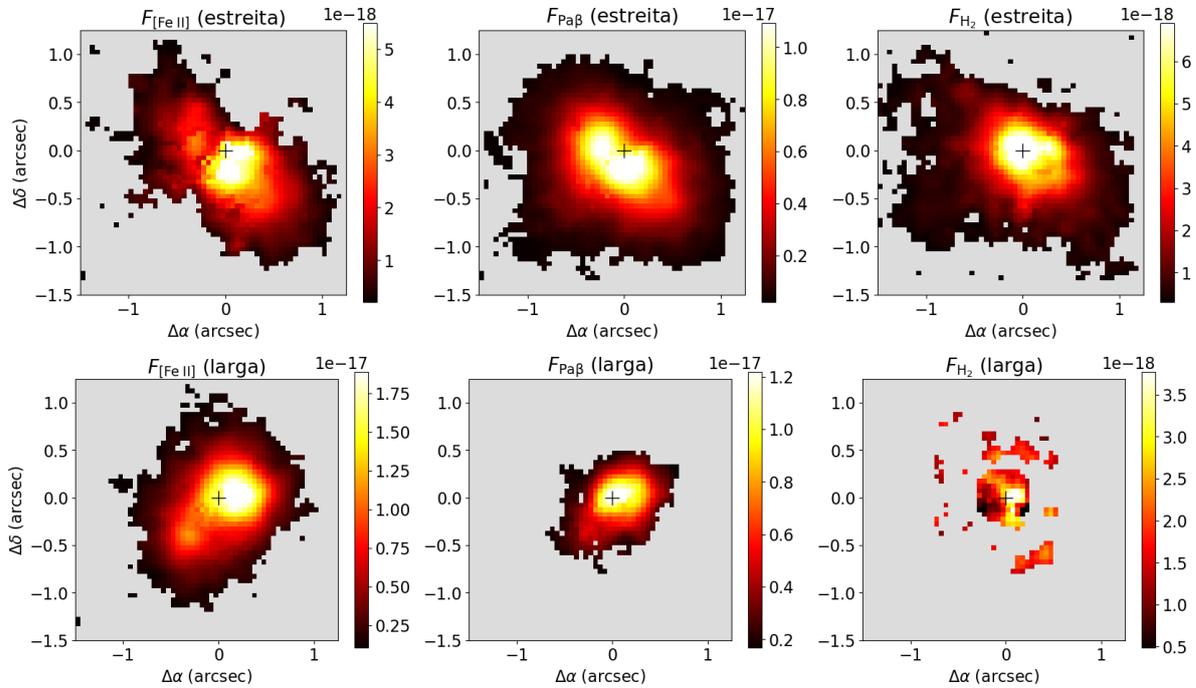


Figura 4.10 – Mapas de campo de velocidades para a componente estreita (painéis superiores) e larga (painéis inferiores) das linhas do  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (à esquerda),  $\text{Pa}\beta$  (ao centro) e  $\text{H}_2$  (à direita).

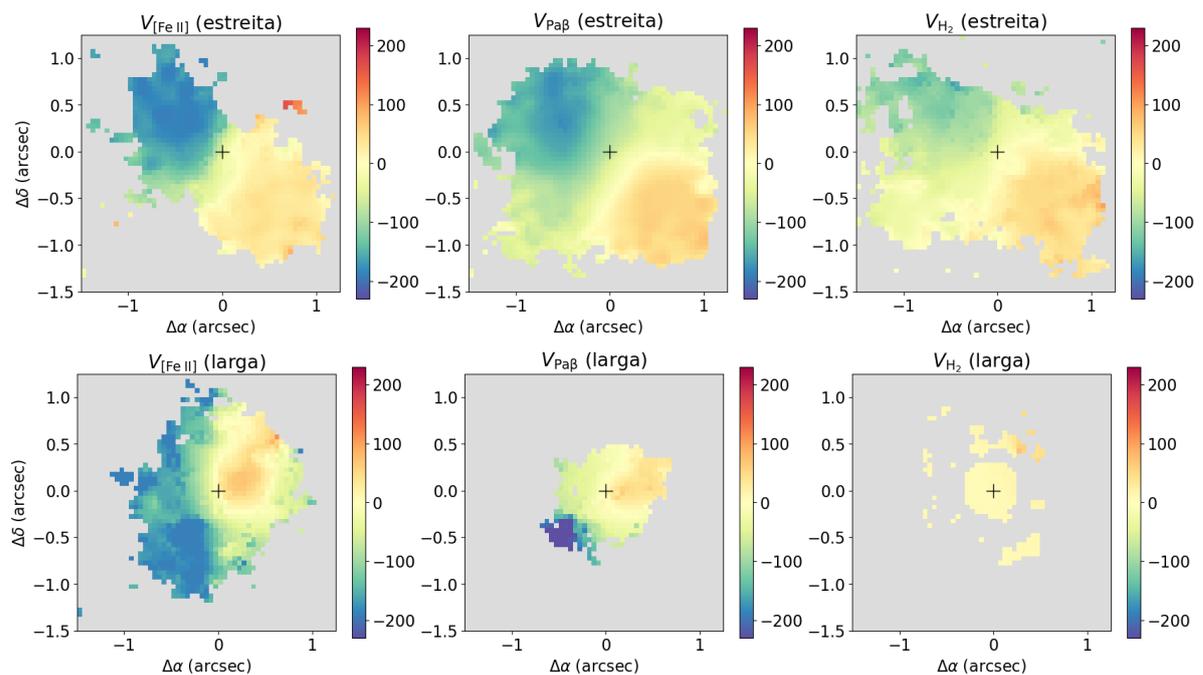
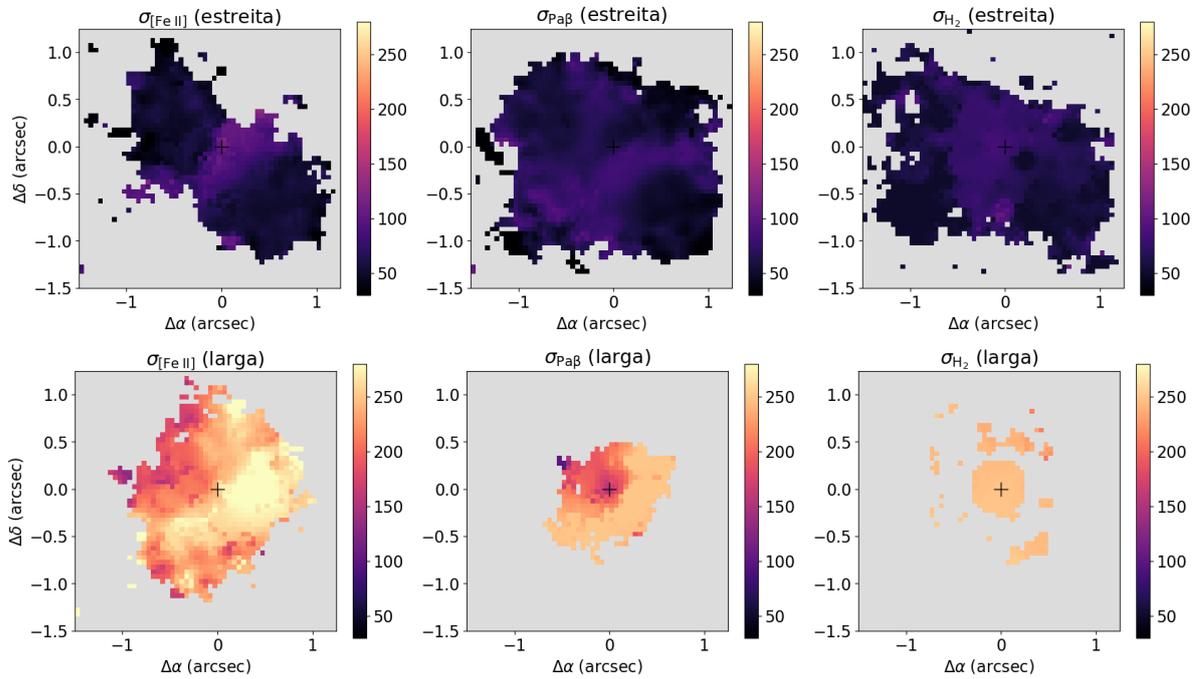


Figura 4.11 – Mapas de dispersão de velocidades para a componente estreita (painéis superiores) e larga (painéis inferiores) das linhas do [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (à esquerda), Pa $\beta$  (ao centro) e H $_2$  (à direita).



para o [Fe II] é mais estendido a noroeste e a sudeste do núcleo, enquanto que para o Pa $\beta$  e H $_2$  os valores se distribuem ao norte e ao sul do núcleo. A análise dos mapas para a componente larga (painéis inferiores) revela maiores valores ao longo da extensão do mapa. Para o [Fe II], valores altos de  $\sigma$  são encontrados em uma região estendida próxima ao núcleo, similar ao mapa da componente estreita da mesma linha, com um formato aproximadamente simétrico em relação ao mesmo, com valores que superam, em alguns casos,  $\approx 250 \text{ km s}^{-1}$ . Os mapas para Pa $\beta$  e H $_2$  evidenciam apenas medidas confinados à região central, onde no caso do Pa $\beta$  são encontrados os valores mais altos em uma região alongada, semelhante à presente nos mapas do para o [Fe II]. Para o H $_2$ , valores aproximadamente constantes de  $\sigma$  são medidos apenas numa região compacta nuclear, com valores de  $\approx 250 \text{ km s}^{-1}$ .

## 5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

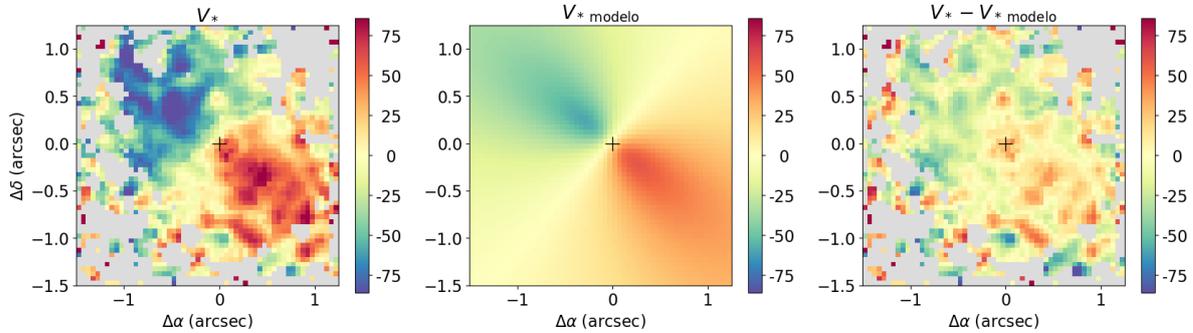
### 5.1 CINEMÁTICA ESTELAR

Com o objetivo de obter informações sobre os parâmetros físicos associados aos movimentos das estrelas, ajustou-se o campo de velocidades estelar pela Equação 3.5, que descreve um disco em rotação. Na Figura 5.1 mostra-se o campo de velocidades observado (esquerda), o modelo de disco em rotação (centro) e o mapa de resíduos (direita), calculado como a diferença entre o campo de velocidades estelar observado e o modelo ajustado. Uma inspeção do mapa de resíduos revela que, em geral, o movimento das estrelas é bem descrito pelo modelo analítico, que assume órbitas circulares executadas no plano da galáxia. Os resíduos do modelo não ultrapassam  $\pm 25 \text{ km s}^{-1}$  na maioria das regiões.

Durante o ajuste, o centro cinemático foi mantido fixo à posição correspondente ao pico da emissão contínua e os parâmetros do melhor ajuste são: amplitude da curva de rotação  $A = 274 \pm 20 \text{ km s}^{-1}$ , inclinação do disco em relação ao plano do céu  $i = 51 \pm 5^\circ$ , ângulo de posição da linha dos nodos  $\Psi_0 = 50 \pm 5^\circ$  em relação ao norte, velocidade sistêmica  $V_S = 3270 \pm 7 \text{ km s}^{-1}$ ,  $C_0$  e  $p$  atingiram os limites permitidos no ajuste com  $C_0 = 0''.25$  e  $p = 1.5$ . A velocidade sistêmica é consistente com o valor obtido para a galáxia utilizando observações da linha do hidrogênio em 21 cm, de  $V_S = 3277 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$  (Theureau et al., 1998). A inclinação do disco é ligeiramente menor ao valor obtido para o disco em grande escala ( $i \approx 63^\circ$ ) e a orientação da linha dos nodos é consistente com o valor estimado para o disco em grande escala da galáxia ( $50^\circ$ ), utilizando observações na banda K (Jarrett et al., 2003). Dessa forma, o campo de velocidades das estrelas na região central é dominado por rotação no plano do disco com um padrão de rotação consistente com a orientação da galáxia em grande escala.

Observa-se ainda, uma anti-correlação entre a LOSVD estelar e o momento de Gauss-Hermite  $h_3$  (Figura 4.2). Valores positivos de  $h_{3*}$  são observados em regiões onde o campo de velocidades estelar apresenta os maiores *blueshifts* (valores negativos), enquanto que valores negativos de  $h_{3*}$  são observados em regiões onde o campo de velocidades apresenta *redshifts* (valores positivos) em relação a velocidade sistêmica da galáxia. Resultados semelhantes foram encontrados por Riffel et al. (2017) em uma amostra de 16 galáxias ativas observadas com o NIFS, e interpretados como sendo devido ao movimento de estrelas do bojo, cuja velocidade projetada na linha de visada é menor das que as estrelas do disco, que são dominantes no padrão de rotação observado no campo de velocidades estelar.

Figura 5.1 – Mapeamento do campo de velocidades estelar obtido com a rotina pPXF (à esquerda) através do ajuste das bandas do CO presentes no espectro da banda K. O mapa central representa o ajuste de um modelo de disco em rotação para o campo de velocidades estelar obtido. À direita têm-se o mapa de resíduos, avaliado como a diferença entre o campo de velocidade estelar e modelo obtido.



## 5.2 CINEMÁTICA DO GÁS

Os campos de velocidades do gás obtidos a partir do ajuste dos perfis das linhas de emissão a partir de curvas de Gauss-Hermite (Figura 4.4) apresentam claramente um padrão de rotação com o lado nordeste da galáxia se aproximando e o lado sudoeste se afastando de nós, semelhante ao padrão observado para as estrelas (Figura 4.2). Entretanto, também observam-se diferenças entre os campos de velocidades do gás e estelar, como por exemplo a maior amplitude de velocidade e distorções nos campos de velocidades observadas para o gás. Além disso, os momentos de Gauss-Hermite  $h_3$  e  $h_4$  apresentam valores absolutos altos (de até 0.2) e há um aumento na dispersão de velocidades do gás ionizado em uma estrutura perpendicular ao disco da galáxia, que apresenta um formato semelhante ao de um bicone. Essas características indicam que o gás emissor na região central de NGC 1125 apresenta, além de uma componente de rotação, outra componente cinemática importante, possivelmente associada a *outflows*. Considerando esse fator, optou-se pela realização do ajuste de duas componentes gaussianas para cada linha de emissão a fim de isolar as duas componentes cinemáticas.

Os mapas para o campo de velocidades e dispersão de velocidades para as componentes estreita e larga das linhas de emissão são mostrados nas Figuras 4.10 e 4.11. Observa-se que o gradiente de velocidades visto no campo de velocidades para a componente estreita das linhas, exibidas nos painéis superiores da Figura 4.10 coincide espacialmente com o eixo maior da galáxia, exibindo um padrão de rotação ao redor da região central que assemelha-se ao obtido para as estrelas. Os painéis inferiores da mesma figura apresentam o mesmo resultado para a componente larga das linhas. Para as linhas do [Fe II] e Pa $\beta$  em particular nota-se que o gradiente de velocidade é perpendicular ao observado para as estrelas, com regiões em *blueshift* e *redshift* a noroeste e a sudeste do núcleo, respectivamente. A componente larga das linhas é interpretada como sendo

devida a emissão de gás em *outflow*, possivelmente devido a ventos emanados pelo AGN de NGC 1125. O mesmo mapeamento para a componente larga linha do  $H_2$  (mapa inferior direito da Figura 4.10) revela apenas componentes largas em regiões próximas ao núcleo, onde uma possível interpretação seja a emissão de um gás do disco, que é perturbado pela passagem do *outflow* de gás ionizado. Nos mapas inferiores da Figura 4.11, têm-se que a dispersão de velocidades para a componente larga da linha do  $[Fe II]$  (mapa inferior esquerdo) e  $Pa\beta$  (mapa inferior central) apresentam seus maiores valores próximos à região central, com uma distribuição espacial distinta à observada para a componente estreita das respectivas linhas. Essas regiões de maiores intensidades coincidem espacialmente com as estruturas em *redshift* e *blueshift* vistas nos mapeamento do campo de velocidades (painéis inferiores da Figura 4.10). Como também visto nos mapas para a distribuição de fluxo da componente larga das mesmas linhas (painéis inferiores da Figura 4.9), a distribuição espacial da emissão e da cinemática desta componente é perpendicular à observada para a componente estreita das linhas, mostrando, em geral, uma dispersão de velocidades maior ( $\sigma > 150 \text{ km s}^{-1}$ ) do que a encontrada para a cinemática estelar.

A componente estreita das linhas de emissão apresenta um padrão de rotação nos campos de velocidades, baixos valores de dispersão de velocidades ( $\sigma < 150 \text{ km s}^{-1}$ ) e emissão predominantemente ao longo do eixo maior da galáxia. Com isso, interpretamos que a emissão da componente estreita das linhas observadas é devida ao gás no disco da galáxia. Com o intuito de isolar espacialmente componentes cinemáticas não associadas à rotação no disco da galáxia, foram construídos mapas de resíduos de velocidades, obtidos a partir da subtração do modelo de disco em rotação que representa o campo de velocidades estelar (painel central da Figura 5.1) dos campos de velocidades observados para o gás. A Figura 5.2 mostra os mapas de resíduos obtidos utilizando-se as velocidades estimadas através do ajuste dos perfis das linhas de emissão pelas séries de Gauss-Hermite e a Figura 5.3 mostra os mapas de resíduos de velocidades obtidos utilizando-se as velocidades estimadas a partir do ajuste da componente estreita das linhas de emissão por curvas Gaussianas.

Nos mapas apresentados na Figura 5.2, para a linha do  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (painel superior direito), nota-se regiões em *redshift* e *blueshift* espacialmente resolvidas à noroeste e à sudeste do núcleo, respectivamente, que correlacionam-se espacialmente com os maiores valores de dispersão de velocidades vista para a mesma linha no mapa inferior esquerdo da Figura 4.11. Uma correlação similar, embora menos notável, pode ser vista no mapa inferior esquerdo da Figura 5.2 para a linha do  $Pa\beta$ . Esses resíduos são produzidos devido ao *outflow* ionizado, mencionado acima. Como a linha do  $[P II]$  é observada somente na região interna a  $0''.5$  e o *outflow* é visto principalmente em escalas maiores, não observam-se resíduos de velocidades altos para essa linha de emissão. Da mesma forma, os resíduos de velocidades vistos para a linha do  $H_2$  são próximos a zero em todos os pontos, indicando que a emissão do  $H_2$  observada é produzida por gás em rotação no

plano do disco.

Nos mapas de resíduos obtidos utilizando-se as velocidades da componente estreita das linhas de emissão (Figura 5.3) observam-se valores de até aproximadamente  $100 \text{ km s}^{-1}$  ao longo do eixo maior da galáxia. Isso é esperado, considerando que a amplitude de velocidades para o gás é maior do que para as estrelas, como pode ser visto comparando-se os campos de velocidades das Figuras 4.2 e 4.10. Uma possível interpretação para os mapas de resíduos de velocidades obtidos para NGC 1125 é que os excessos de velocidades estejam associados a efeitos de projeção, uma vez que o gás está localizado em um disco fino, enquanto que o campo de velocidades estelar tem contribuição de estrelas do bojo. Uma interpretação semelhante é dada para a galáxia NGC 2110 por Diniz et al. (2019).

Em resumo, a cinemática do gás na região central de NGC 1125 apresenta duas componentes: uma devida a rotação no disco da galáxia com amplitude de velocidade de cerca de  $150 \text{ km s}^{-1}$  e dispersão de velocidades de  $50$  a  $100 \text{ km s}^{-1}$  e outra componente devida a *outflows* de gás ionizado com velocidades projetadas na linha de visada de  $150 \text{ km s}^{-1}$ , dispersão de velocidades de aproximadamente  $250 \text{ km s}^{-1}$  e orientado aproximadamente perpendicular ao disco da galáxia. Esses *outflows* interagem com o gás do disco e produzem a componente larga, observada nas linhas de emissão do  $\text{H}_2$ .

### 5.3 ORIGEM DA EMISSÃO DO GÁS

As linhas de emissão do hidrogênio molecular  $\text{H}_2$  em galáxias com núcleo ativo possuem mecanismos de excitação associados que variam entre processos térmicos e não térmicos. A excitação térmica ocorre por choques (Hollenbach; McKee, 1989), frequentemente atribuídos à interação do jato de partículas do AGN (jato rádio) com o gás, ou campo de radiação em raios-X provenientes do AGN (Maloney; Hollenbach; Tielens, 1996). Já o mecanismo de excitação de origem não térmica compreende a absorção de fótons no UV ( $912\text{--}1108 \text{ \AA}$ ) nas bandas Lyman e Werner (Black; van Dishoeck, 1987). A distinção entre os dois mecanismos predominantes na excitação da molécula de  $\text{H}_2$  pode ser feita através de medidas de razões entre intensidades de linhas de emissão, tais como  $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}/\text{Br}\gamma$ , como apresentado na Figura 4.8 (painel inferior direito). Através da análise deste mapa, é possível verificar que a região central é dominada por valores menores ou iguais  $0.4$ , principalmente até regiões a  $\approx 0''.5$  do núcleo. Valores característicos como esse em geral estão associados à excitação por fluorescência em regiões onde há estrelas jovens que aquecem o gás molecular pelo seu campo de radiação, emitindo fótons no UV que são absorvidos pela molécula de  $\text{H}_2$ . Entretanto, observa-se os maiores valores de razão ( $\approx 0.6\text{--}1.6$ ) nos limites da região onde há medidas, a sudoeste e a nordeste do núcleo, chegando até  $\approx 1''.0$  do campo de visão. Para valores entre  $0.4\text{--}6.0$ , os proces-

Figura 5.2 – Mapas de resíduos de velocidades para as linhas do [P II]  $\lambda 1.1886 \mu\text{m}$  (mapa superior esquerdo), [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (mapa superior direito), Pa $\beta$  (mapa inferior esquerdo) e H<sub>2</sub>  $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$  (mapa inferior direito), obtidos a partir do modelo de rotação estelar dos campos de velocidades obtidos dos ajustes dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite.

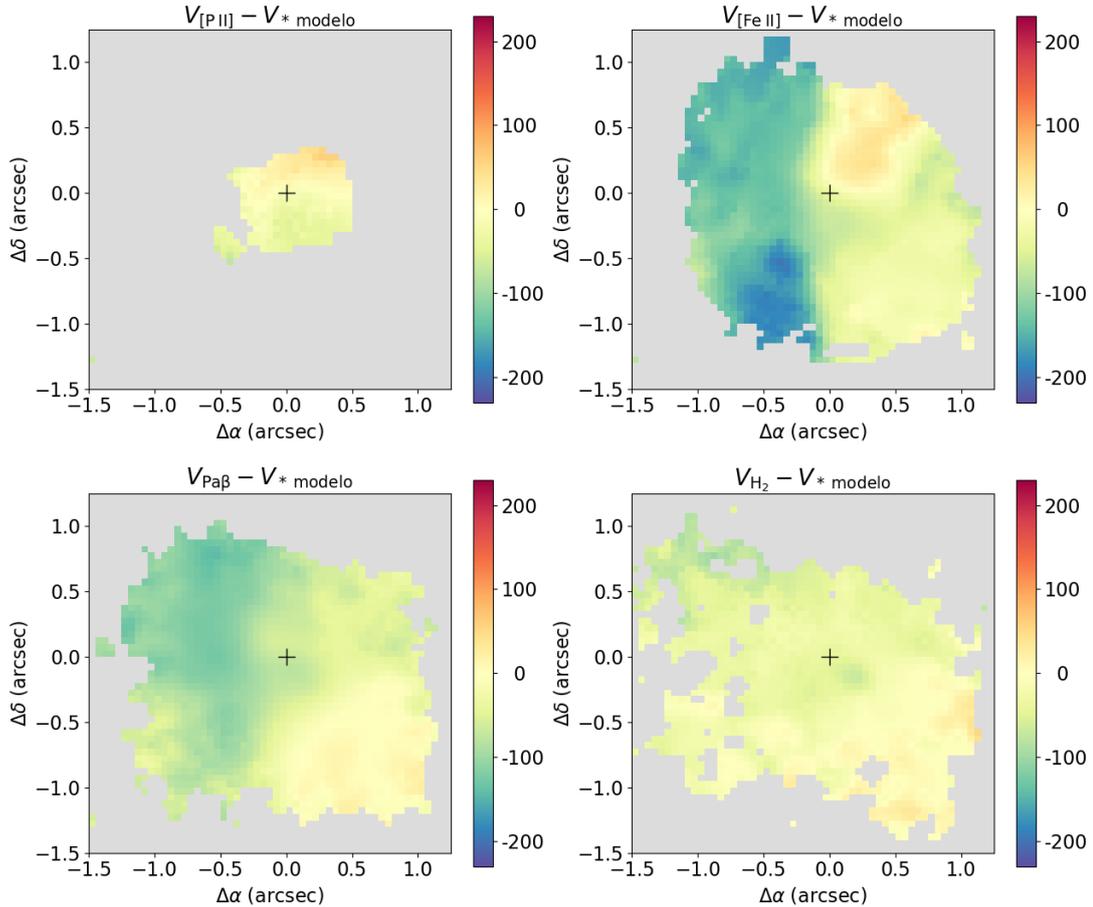
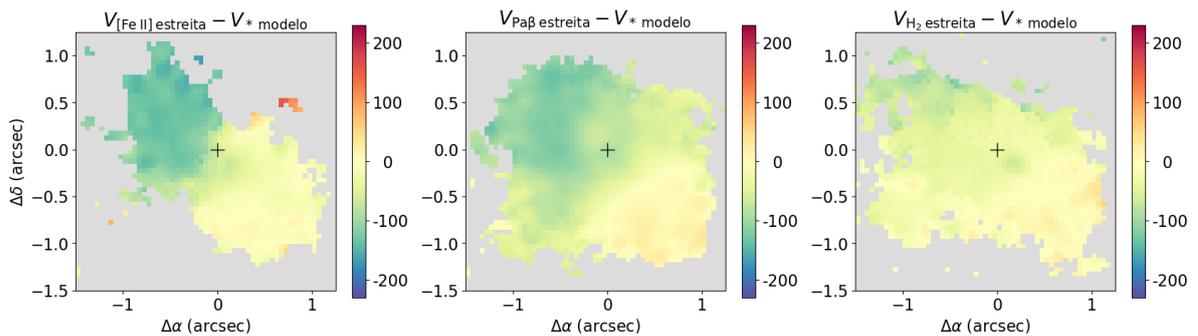


Figura 5.3 – Mapas de resíduos de velocidades para a componente estreita das linhas [Fe II]  $\lambda 1.2570 \mu\text{m}$  (mapa à esquerda), Pa $\beta$  (mapa central) e H<sub>2</sub>  $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$  (mapa à direita).



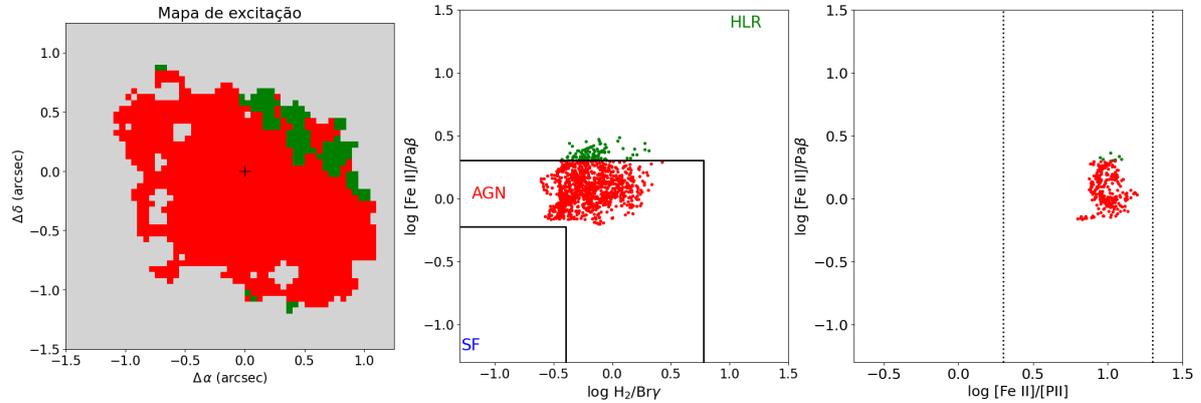
soos térmicos dominam a produção das linhas de emissão do  $H_2$  no infravermelho próximo (Riffel; Storchi-Bergmann; Winge, 2013b).

Para as linhas do [Fe II], argumenta-se que a emissão desse gás se dá em regiões de gás parcialmente ionizado, produzidas através da fotoionização da radiação contínua emitida pelo AGN, principalmente na faixa de raios-X (Simpson et al., 1996) e também por choques (Riffel et al., 2006). Novamente, para determinar a natureza do mecanismo de excitação do [Fe II], seja por raios-X ou choques, pode-se utilizar razões de intensidades de linhas, tais como  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / Pa\beta$  e  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / [P II] \lambda 1.1886 \mu m$ . A razão  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / Pa\beta$  depende da intensidade relativa dos volumes de gás parcialmente e totalmente ionizado e valores típicos para AGNs são de 0.6 a 2.0, enquanto que regiões de formação estelar possuem valores menores que 0.6 e regiões dominadas por choques, tais como remanescentes de supernovas, possuem valores maiores do que 2.0 (Riffel; Storchi-Bergmann; Winge, 2013b). O mapa de  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / Pa\beta$  para NGC 1125 (painel superior esquerdo da Figura 4.8) mostra valores típicos de excitação do gás por processos associados a AGNs na maioria das regiões. Os menores valores são observados ao longo do disco da galáxia, enquanto que os maiores valores são vistos ao longo do *outflow*, indicando uma possível contribuição adicional de choques produzidos pelo *outflow* na emissão de [Fe II] observada.

De acordo com Oliva et al. (2001), regiões onde a razão  $[Fe II] / [P II] \gtrsim 20$  indicam uma excitação produzida predominantemente por choques (valores típicos para remanescentes de supernovas), enquanto que regiões onde  $[Fe II] / [P II] \lesssim 2$  a predominância é a excitação por fotoionização. O mapa de razão de linhas da Figura 4.8 (painel superior direito) mostra valores maiores do que 2 em todos os pontos, porém a razão não atinge valores da ordem de 20. O intervalo de valores de  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / [P II] \lambda 1.1886 \mu m$  indica que ambos os processos, fotoionização e choques, são importantes na produção da emissão de [Fe II] em NGC 1125.

Uma outra forma de investigar a origem da emissão de  $H_2$  e [Fe II] é através de diagramas de diagnóstico baseados em razões de linhas de emissão, tais como  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / Pa\beta$  vs.  $H_2 / Br\gamma$  e  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / Pa\beta$  vs.  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / [P II] \lambda 1.1886 \mu m$  (Rodríguez-Ardila; Riffel; Pastoriza, 2005; Storchi-Bergmann et al., 2009; Riffel; Storchi-Bergmann; Winge, 2013b; Riffel et al., 2021a). Esses diagramas foram construídos para NGC 1125 utilizando os fluxos obtidos a partir do ajuste dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite. O painel da Figura 5.4 mostra, da esquerda para a direita, o mapa de excitação, diagrama de razão de linhas  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / Pa\beta$  vs.  $H_2 / Br\gamma$  e  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / Pa\beta$  vs.  $[Fe II] \lambda 1.2570 \mu m / [P II] \lambda 1.1886 \mu m$ , respectivamente. A representação em cores do mapa de excitação é a mesma para o diagrama de razão de linhas central. A separação em regiões, delimitadas pelas linhas contínuas do painel central da Figura 5.4 foram obtidas de Riffel, Storchi-Bergmann e Winge (2013b), o qual separa regiões *Star Forming* (SF), AGN e *High Line Ratio* (HLR), sendo esta regiões onde excitação por

Figura 5.4 – Diagramas de diagnóstico  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$  vs.  $\text{H}_2/\text{Br}\gamma$  (painel central) e  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$  vs.  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}/[\text{P II}] \lambda 1.1886 \mu\text{m}$  (painel da direita). O mapa de excitação mostrado no painel da esquerda utiliza a mesma codificação de cores usado no diagrama  $[\text{Fe II}]/\text{Pa}\beta$ .



choques é o processo dominante na produção das linhas do  $\text{H}_2$  e  $[\text{Fe II}]$ . As linhas pontilhadas verticais no mapa da direita mostram as delimitações da razão  $[\text{Fe II}]/[\text{P II}]$  que separam fotoionização e choques segundo o critério de Oliva et al. (2001), respectivamente.

Como observado no mapa de excitação apresentado na Figura 5.4, em praticamente todas as regiões onde as 4 linhas envolvidas no diagrama  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$  vs.  $\text{H}_2/\text{Br}\gamma$  foram detectadas, os valores observados são típicos de AGN. Em uma pequena região para noroeste do núcleo, mesma direção do *outflow*, o mapa de excitação indica que a emissão é dominada por choques. Considerando ainda que os mapas de razões de linhas  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$  e  $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}/\text{Br}\gamma$  mostrados na Figura 4.8 aumentam ao longo do eixo do *outflow* (noroeste – sudeste) e que os valores de  $[\text{Fe II}] \lambda 1.2570 \mu\text{m}/[\text{P II}] \lambda 1.1886 \mu\text{m}$  estão entre os valores dominados por fotoionização ( $< 2.0$ ) e aqueles dominados por choques ( $> 20.0$ ), nossos resultados indicam que a emissão do  $\text{H}_2$  e  $[\text{Fe II}]$  em NGC 1125 é produzida por uma mistura de choques produzidos pelos *outflows* e por processos associados ao campo de radiação do AGN.

Os resultados encontrados para NGC 1125 acerca dos mecanismos de excitação do gás estão de acordo com estudos recentes, que investigaram a origem da emissão do  $\text{H}_2$  e  $[\text{Fe II}]$  utilizando observações obtidas com o NIFS de 34 galáxias Seyfert próximas (Riffel et al., 2021a, 2021b). Esses trabalhos apontam para uma mistura de processos, com choques sendo os dominantes em regiões mais afastadas do núcleo das galáxias e o campo de radiação do AGN dominando em regiões mais próximas do mesmo. Por exemplo, Riffel et al. (2021b) encontram uma contribuição de choques em 40% das galáxias em uma amostra de 34 galáxias Seyfert do Universo local.

### 5.3.1 Massas de gás e Feeding do AGN em NGC 1125

Podemos calcular as massas de gás molecular quente ( $M_{\text{H}_2}$ ) e ionizado ( $M_{\text{HII}}$ ) a partir dos fluxos das linhas de emissão do  $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$  e  $\text{Pa}\beta$ , respectivamente. A massa de gás molecular pode ser estimada por (Scoville et al., 1982; Diniz et al., 2015):

$$\left(\frac{M_{\text{H}_2}}{M_\odot}\right) = 5.0776 \times 10^{13} \left(\frac{F_{\text{H}_2 2.1218}}{\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}}\right) \left(\frac{D}{\text{Mpc}}\right)^2, \quad (5.1)$$

onde  $F_{\text{H}_2 2.1218}$  é o fluxo observado para a linha  $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$  e  $D$  é a distância até a galáxia.

A massa de gás ionizado pode ser obtida por (Osterbrock; Ferland, 2006; Storchi-Bergmann et al., 2009):

$$\left(\frac{M_{\text{HII}}}{M_\odot}\right) = 5.1 \times 10^{18} \left(\frac{F_{\text{Pa}\beta}}{\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}}\right) \left(\frac{D}{\text{Mpc}}\right)^2 \left(\frac{N_e}{\text{cm}^{-3}}\right)^{-1}, \quad (5.2)$$

onde  $F_{\text{Pa}\beta}$  é o fluxo observado da linha  $\text{Pa}\beta$  e  $N_e$  é a densidade eletrônica. Para estimar a massa de gás ionizado, assumimos um valor típico de densidade eletrônica ( $N_e = 500 \text{ cm}^{-3}$ ) estimada para núcleos ativos de galáxias a partir dos fluxos das linhas de emissão do enxofre no espectro visível  $[\text{S II}]\lambda\lambda 6717, 6730$  (Dors et al., 2014; Freitas et al., 2018; Kakkad et al., 2018).

Calculamos as massas de gás molecular e ionizado para o gás do disco utilizando os fluxos totais das componentes estreitas das linhas e as massas de gás em *outflow* são estimadas utilizando-se os fluxos das componentes largas. Os fluxos integrados para a componente estreita das linhas são obtidos a partir da soma dos fluxos desta componente em todos os *spaxels* em que ela é detectada, resultando em  $F_{\text{H}_2 2.1218} = 2.4 \times 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  e  $F_{\text{Pa}\beta} = 4.2 \times 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ . Substituindo-se esses fluxos nas equações acima, juntamente com a distância  $D = 45.9 \text{ Mpc}$  e  $N_e = 500 \text{ cm}^{-3}$ , obtém-se  $M_{\text{H}_2} \approx 260 M_\odot$  e  $M_{\text{HII}} \approx 9.0 \times 10^4 M_\odot$  para as massas de gás molecular quente e massa de gás ionizado contidos no disco na região interna a  $\approx 350 \text{ pc}$  ( $1''.5$ ) da galáxia, respectivamente.

Similarmente, calculamos as massas de gás contidas no *outflow*, integrando os fluxos da componente larga das linhas. Obtemos  $F_{\text{H}_2 2.1218} = 4.2 \times 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  e  $F_{\text{Pa}\beta} = 2.0 \times 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  e conseqüentemente  $M_{\text{H}_2} \approx 45 M_\odot$  e  $M_{\text{HII}} \approx 4.3 \times 10^4 M_\odot$ . Como os fluxos das linhas de emissão não foram corrigidos por extinção, as massas determinadas devem ser consideradas como limites inferiores. Considerando as massas estimadas acima, observa-se que a maior parte do gás está contida no disco da galáxia. A fração de gás contida no *outflow* corresponde a cerca de 32% para o gás ionizado e 15% para o gás molecular quente.

Podemos comparar as massas de gás obtidas para NGC 1125 com valores estimados para a região central de outras galáxias ativas próximas. Riffel et al. (2018) apresentam estimativas de massas de gás ionizado e molecular quente para uma amostra de 20 ga-

laxias Seyfert próximas. Eles obtiveram valores de massas nos intervalos de 47–301 e  $(3\text{--}440) \times 10^4 M_{\odot}$  para o gás molecular quente e para o gás ionizado, respectivamente. Somando as massas de gás no disco e no *outflow* para NGC 1125 obtemos os valores de  $305 M_{\odot}$  e  $1.3 \times 10^5 M_{\odot}$ , os quais são consistentes com os valores observados anteriormente para objetos semelhantes. A razão entre a massa de gás ionizado e a massa de gás molecular quente para NGC 1125 é  $M_{\text{H II}}/M_{\text{H}_2} = 4360$ , a qual é consistente com o intervalo de valores observado por Riffel et al. (2018), de 200 a 8000.

Considerando uma taxa de acreção típica de  $\dot{m} = 10^{-3} M_{\odot}/\text{ano}$  (Riffel et al., 2018) para o AGN de NGC 1125, a massa de gás ionizado presente no disco é o suficiente para manter a atividade nuclear por um ciclo de atividade  $\approx 10^7$  anos. Como o gás molecular quente representa uma fração muito pequena de todo o gás molecular presente na galáxia, com massas de gás molecular frio sendo tipicamente de  $10^5$  a  $10^7$  vezes maiores (Dale et al., 2005), o reservatório de gás presente nos  $\approx 350$  pc centrais de NGC 1125 deve ser muito maior do que o necessário para alimentar o AGN, podendo ser consumido com formação estelar.

#### 5.4 TAXA E POTÊNCIA CINÉTICA DOS *OUTFLOWS*

A estimativa da taxa de *outflow* de gás ionizado depende da massa de gás em *outflow*  $M_{\text{out}}$ , da velocidade  $v_{\text{out}}$  e do raio  $R_{\text{out}}$  no qual esta grandeza é avaliada. Ainda, a forma da equação utilizada reflete a estrutura geométrica considerada, como apresentado em (Lutz et al., 2020). Para o presente caso da galáxia NGC 1125, partiremos do princípio de que a estrutura em *outflow* é formada por um gás com uma distribuição uniforme ao longo de um volume bicônico, tomando como referência a estrutura simétrica em *redshift* e em *blueshift* vistas no mapa de resíduos para o [Fe II] (mapa superior direito da Figura 5.2) e nos mapas de velocidade da componente larga das linhas de emissão do gás ionizado (Figura 4.10). Com isso, podemos utilizar a seguinte relação (Fiore et al., 2017; Kakkad et al., 2020).

$$\dot{M}_{\text{out}} = 3 \frac{M_{\text{out}} v_{\text{out}}}{R_{\text{out}}}, \quad (5.3)$$

com  $M_{\text{out}}$  sendo a massa do gás em *outflow*, calculada anteriormente na Seção 5.3.1 ( $M_{\text{out}} = M_{\text{H II}} \approx 4.3 \times 10^4 M_{\odot}$ ),  $v_{\text{out}} = 150/\text{sen } \theta \text{ km s}^{-1}$ , onde  $\theta$  é a orientação do eixo do bicone em relação à linha de visada, e a velocidade do *outflow* projetada na linha de visada é  $150 \text{ km s}^{-1}$ , obtida do mapa de velocidades para a componente larga das linhas, e  $R_{\text{out}} \approx 230 \text{ pc}$  ( $1''0$ ) é a distância radial estimada novamente a partir da extensão da região onde a componente de *outflow* é detectada. Substituindo estes valores na Equação 5.3 obtemos um valor de  $\dot{M}_{\text{out}} \approx 8.3 \times 10^{-3}/\text{sen } \theta M_{\odot}/\text{ano}$ . Uma vez que o valor de  $\theta$  é desconhecido,

assumiremos um valor intermediário de  $\theta = 45^\circ$ , com isso obtendo um valor para a taxa de *outflow* de  $\dot{M}_{\text{out}} \approx 6.0 \times 10^{-3} M_\odot/\text{ano}$ . Considerando que NGC 1125 hospeda um núcleo ativo do tipo Seyfert 2, um valor de  $\theta$  próximo de zero não é consistente com sua classificação, uma vez que para ângulos pequenos o AGN estaria sendo visto de frente e seria classificado como do tipo Seyfert 1. Da mesma forma, um valor de  $\theta$  próximo de  $90^\circ$  também não é consistente com as observações. Nesse caso, o cone estaria orientado ao longo do plano do céu e a velocidade projetada ao longo da linha de visada seria próxima à zero, o que não é apoiado pelo campo de velocidades observado para a componente larga das linhas.

Com a obtenção da taxa de *outflow* calculada acima, podemos determinar a potência cinética do *outflow* a partir da seguinte equação

$$\dot{E}_{\text{kin}} \approx \frac{\dot{M}_{\text{out}}}{2} (v_{\text{out}}^2 + 3\sigma_{\text{out}}^2). \quad (5.4)$$

onde  $\sigma_{\text{out}} \approx 250 \text{ km s}^{-1}$  é a dispersão de velocidades da componente larga das linhas, estimada a partir do mapa de  $\sigma$  para a componente larga da linha do [Fe II] (Figura 4.11). Novamente, considerando  $\theta = 45^\circ$ , obtemos um valor de  $\dot{E}_{\text{kin}} \approx 4.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ .

Podemos comparar a potência cinética do *outflow* com a luminosidade bolométrica do AGN de NGC 1125, a qual pode ser obtida a partir da luminosidade em raios X duros (14–195 keV),  $L_X$ , por  $\log L_{\text{bol}} = 0.0378(\log L_X)^2 - 2.03 \log L_X + 61.6$  (Ichikawa et al., 2017). Usando  $\log L_X = 42.64$  (Riffel et al., 2021b), obtém-se  $L_{\text{bol}} = 2 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ . Dessa forma, a potência cinética dos outflows em NGC 1125 corresponde a cerca de somente 0.02% da luminosidade bolométrica do AGN. De acordo com Hopkins e Elvis (2010), somente *outflows* com potências acima de 0.5% da luminosidade do AGN são eficientes em suprimir a formação estelar na galáxia. Assim, os *outflows* observados em NGC 1125 não são potentes o suficiente para afetar a formação de novas estrelas na galáxia hospedeira, podendo somente redistribuir o gás na região central da galáxia, porém o mesmo ainda continua disponível para formação de novas estrelas.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho utilizamos observações de espectroscopia de campo integral nas bandas J e K dos  $3 \times 3 \text{ arcsec}^2$  centrais da galáxia Seyfert NGC 1125, realizadas com o instrumento NIFS no telescópio Gemini Norte. Os dados coletados foram utilizados para estudar a distribuição e cinemática das estrelas e do gás molecular e ionizado. Os principais resultados obtidos são os seguintes:

- O campo de velocidades estelar é dominado por movimentos de rotação no plano da galáxia e bem representado por um modelo de disco em rotação.
- A emissão do  $\text{H}_2$  em NGC 1125 é produzida por processos térmicos, que incluem aquecimento do gás por raios-X da fonte central e choques.
- O campo de velocidades do gás molecular é dominado por uma componente de rotação no plano da galáxia, enquanto que o gás ionizado apresenta uma componente devida a *outflows* de gás a partir do AGN central.
- A geometria do *outflow* é aproximadamente bicônica, com velocidades negativas vistas para sudoeste do núcleo e velocidades positivas para nordeste do mesmo. As velocidades máximas observadas são de cerca de  $150 \text{ km s}^{-1}$ .
- As massas de gás molecular quente e gás ionizado na região interior a  $\approx 350 \text{ pc}$  (contidas no disco) foram calculadas como sendo  $M_{\text{H}_2} \approx 260 M_\odot$  e  $M_{\text{H II}} \approx 9.0 \times 10^4 M_\odot$ , respectivamente. Já as massas de gás molecular quente e ionizado no *outflow* foram determinadas como sendo  $45 M_\odot$  e  $M_{\text{H II}} \approx 4.3 \times 10^4 M_\odot$ , respectivamente. Conclui-se, então, que a maior parte do gás está contida no disco da galáxia. Além disso, o gás que constitui o *outflow* corresponde a cerca de 32% do gás ionizado e 15% do gás molecular quente presente na região central da galáxia.
- A taxa de ejeção de gás ionizado é de  $\dot{M}_{\text{out}} \approx 6.0 \times 10^{-3} M_\odot/\text{ano}$ , enquanto que a potência cinética do *outflow* vale  $\dot{E}_{\text{kin}} \approx 4.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ .
- Os *outflows* observados em NGC 1125 na fase ionizada não são potentes o suficiente para afetar a formação estelar da galáxia hospedeira, mas podem ser eficientes em redistribuir o gás na região central da galáxia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allington-Smith, J. R. et al. New techniques for integral field spectroscopy - I. Design, construction and testing of the GNIRS IFU. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 371, p. 380–394, set. 2006.

Bertola, F. et al. Testing the Gravitational Field in Elliptical Galaxies: NGC 5077. **The Astrophysical Journal**, v. 373, p. 369, jun. 1991.

Black, J. H.; van Dishoeck, E. F. Fluorescent Excitation of Interstellar H<sub>2</sub>. , v. 322, p. 412, nov. 1987.

Cappellari, M. Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 466, n. 1, p. 798–811, abr. 2017.

Cappellari, M.; Emsellem, E. Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 138–147, fev. 2004.

Cardelli, J. A.; Clayton, G. C.; Mathis, J. S. The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction. **The Astrophysical Journal**, v. 345, p. 245, out. 1989.

Combes, F. et al. ALMA observations of feeding and feedback in nearby Seyfert galaxies: an AGN-driven outflow in NGC 1433. **Astronomy & Astrophysics**, v. 558, p. A124, out. 2013.

Content, R. New design for integral field spectroscopy with 8-m telescopes. In: Ardeberg, A. L. (Ed.). **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series**. [S.l.: s.n.], 1997. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 2871), p. 1295–1305.

Dale, D. A. et al. Warm and Cold Molecular Gas in Galaxies. , v. 129, n. 5, p. 2197–2202, maio 2005.

Diniz, M. R.; Riffel, R. A. UMA BIBLIOTECA DE ESPECTROS ESTELARES NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA MEDIDAS DE CINEMÁTICA ESTELAR EM GALÁXIAS. **Ciência e Natura**, v. 33, p. 43–56, 2011.

Diniz, M. R. et al. Feeding versus feedback in AGN from near-infrared IFU observations XI: NGC 2110. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 453, p. 1727–1739, out. 2015.

\_\_\_\_\_. Outflows, inflows, and young stars in the inner 200 pc of the Seyfert galaxy NGC 2110. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 487, n. 3, p. 3958–3970, ago. 2019.

Dors, O. L. et al. Metallicity evolution of AGNs from UV emission lines based on a new index. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 443, n. 2, p. 1291–1300, set. 2014.

Fabian, A. C. Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback. , v. 50, p. 455–489, set. 2012.

Fathi, K. et al. Streaming Motions toward the Supermassive Black Hole in NGC 1097. **Astrophysical Journal Letters**, v. 641, n. 1, p. L25–L28, abr. 2006.

Fiore, F. et al. AGN wind scaling relations and the co-evolution of black holes and galaxies. **Astronomy & Astrophysics**, v. 601, p. A143, maio 2017.

Freitas, I. C. et al. Outflows in the narrow-line region of bright Seyfert galaxies - I. GMOS-IFU data. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 476, n. 2, p. 2760–2778, maio 2018.

Hollenbach, D.; McKee, C. F. Molecule Formation and Infrared Emission in Fast Interstellar Shocks. III. Results for J Shocks in Molecular Clouds. , v. 342, p. 306, jul. 1989.

Hopkins, P. F.; Elvis, M. Quasar feedback: more bang for your buck. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 401, n. 1, p. 7–14, jan. 2010.

Ichikawa, K. et al. The Complete Infrared View of Active Galactic Nuclei from the 70 Month Swift/BAT Catalog. **The Astrophysical Journal**, v. 835, n. 1, p. 74, jan. 2017.

Jarrett, T. H. et al. The 2MASS Large Galaxy Atlas. , v. 125, n. 2, p. 525–554, fev. 2003.

Jones, M. H.; Lambourne, R. J. A. **An Introduction to Galaxies and Cosmology**. [S.l.: s.n.], 2004.

Kakkad, D. et al. Spatially resolved electron density in the narrow line region of  $z \sim 0.02$  radio AGNs. **Astronomy & Astrophysics**, v. 618, p. A6, out. 2018.

\_\_\_\_\_. SUPER. II. Spatially resolved ionised gas kinematics and scaling relations in  $z \sim 2$  AGN host galaxies. **Astronomy & Astrophysics**, v. 642, p. A147, out. 2020.

Liu, B. F.; Mineshige, S.; Ohsuga, K. Spectra from a Magnetic Reconnection-heated Corona in Active Galactic Nuclei. , v. 587, n. 2, p. 571–579, abr. 2003.

Lutz, D. et al. Molecular outflows in local galaxies: Method comparison and a role of intermittent AGN driving. , v. 633, p. A134, jan. 2020.

Maciejewski, W. et al. Gas inflow in barred galaxies - effects of secondary bars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 329, n. 3, p. 502–512, jan. 2002.

Maloney, P. R.; Hollenbach, D. J.; Tielens, A. G. G. M. X-Ray-irradiated Molecular Gas. I. Physical Processes and General Results. , v. 466, p. 561, jul. 1996.

McGregor, P. J. et al. Gemini near-infrared integral field spectrograph (NIFS). In: Iye, M.; Moorwood, A. F. M. (Ed.). **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2003. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 4841), p. 1581–1591.

MO, H.; BOSCH, F. van den; WHITE, S. **Galaxy Formation and Evolution**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010.

Müller, A. S.; Storchi-Bergmann, T.; Nagar, N. M. Mapping NGC 2110 Nuclear Outflows with GMOS-IFU. **Astronomical Society of the Pacific**, v. 460, p. 167, ago. 2012.

Müller Sánchez, F. et al. Molecular Gas Streamers Feeding and Obscuring the Active Nucleus of NGC 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 691, n. 1, p. 749–759, jan. 2009.

NEISTEIN, E.; NETZER, H. What triggers black hole growth? insights from star formation rates. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 437, n. 4, p. 3373–3384, Nov 2013. ISSN 1365-2966. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt2130>>.

Oliva, E. et al. NICS-TNG infrared spectroscopy of NGC 1068: The first extragalactic measurement of [P II] and a new tool to constrain the origin of [Fe II] line emission in galaxies. **Astronomy & Astrophysics**, v. 369, p. L5–L8, abr. 2001.

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

Peterson, M. B. Book Review: An introduction to active galactic nuclei / Cambridge U Press, 1997. **The Observatory**, v. 117, p. 314, out. 1997.

Ramakrishnan, V. et al. Nuclear kinematics in nearby AGN - I. An ALMA perspective on the morphology and kinematics of the molecular CO(2-1) emission. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 487, n. 1, p. 444–455, jul. 2019.

Riffel, R. et al. Optical/NIR stellar absorption and emission-line indices from luminous infrared galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 486, n. 3, p. 3228–3247, jul. 2019.

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

Riffel, R. A. et al. Gemini NIFS survey of feeding and feedback in nearby active galaxies - IV. Excitation. , v. 503, n. 4, p. 5161–5178, maio 2021a.

\_\_\_\_\_. Differences between CO- and calcium triplet-derived velocity dispersions in spiral galaxies: evidence for central star formation? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 446, n. 3, p. 2823–2836, jan. 2015.

\_\_\_\_\_. Gemini NIFS survey of feeding and feedback processes in nearby active galaxies - I. Stellar kinematics. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 470, n. 1, p. 992–1016, set. 2017.

\_\_\_\_\_. Gemini NIFS survey of feeding and feedback processes in nearby active galaxies - II. The sample and surface mass density profiles. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 474, n. 1, p. 1373–1389, fev. 2018.

\_\_\_\_\_. The AGNIFS survey: distribution and excitation of the hot molecular and ionized gas in the inner kpc of nearby AGN hosts. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 504, n. 3, p. 3265–3283, jul. 2021b.

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**, v. 430, p. 2249–2261, abr. 2013.

\_\_\_\_\_. Feeding versus feedback in AGNs from near-infrared IFU observations: the case of Mrk 79. , v. 430, n. 3, p. 2249–2261, abr. 2013.

Riffel, R. A. et al. Gemini near-infrared integral field spectroscopy of the narrow-line region of ESO428-G14: kinematics, excitation and the role of the radio jet. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 373, p. 2–12, nov. 2006.

\_\_\_\_\_. Mapping of molecular gas inflow towards the Seyfert nucleus of NGC4051 using Gemini NIFS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 385, n. 3, p. 1129–1142, abr. 2008.

Rodríguez-Ardila, A.; Riffel, R.; Pastoriza, M. G. Molecular hydrogen and [FeII] in active galactic nuclei - II. Results for Seyfert 2 galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 364, p. 1041–1053, dez. 2005.

Ruschel-Dutra, D. **danielrd6/ifscube v1.0**. [S.l.]: Zenodo, 2020.

Schneider, P. **Extragalactic Astronomy and Cosmology**. [S.l.: s.n.], 2006.

Schnorr-Müller, A. et al. Feeding and feedback in the inner kiloparsec of the active galaxy NGC 2110. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 437, p. 1708–1724, jan. 2014.

\_\_\_\_\_. Gas inflows towards the nucleus of the active galaxy NGC 7213. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 438, n. 4, p. 3322–3331, mar. 2014.

\_\_\_\_\_. Gas inflows towards the nucleus of NGC 1358. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 471, n. 4, p. 3888–3898, nov. 2017.

Scoville, N. Z. et al. Velocity, reddening, and temperature structure of the H<sub>2</sub> emission in Orion. **The Astrophysical Journal**, v. 253, p. 136–148, fev. 1982.

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

Simpson, C. et al. Forbidden Fe<sup>+</sup> emission from active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 283, p. 777–797, dez. 1996.

Storchi-Bergmann, T. et al. Nuclear Spirals as Feeding Channels to the Supermassive Black Hole: The Case of the Galaxy NGC 6951. **The Astrophysical Journal**, v. 670, n. 2, p. 959–967, dez. 2007.

\_\_\_\_\_. Feeding versus feedback in NGC4151 probed with Gemini NIFS - I. Excitation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 394, p. 1148–1166, abr. 2009.

Storchi-Bergmann, T.; Schnorr-Müller, A. Observational constraints on the feeding of supermassive black holes. **Nature Astronomy**, v. 3, p. 48–61, jan. 2019.

Theureau, G. et al. Kinematics of the local universe. VII. New 21-cm line measurements of 2112 galaxies. , v. 130, p. 333–339, jun. 1998.

TRAKHTENBROT, B. et al. Alma observations show major mergers among the host galaxies of fast-growing, high-redshift, supermassive black holes. **The Astrophysical Journal**, American Astronomical Society, v. 836, n. 1, p. 8, Feb 2017. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/8>>.

TREISTER, E. et al. Major galaxy mergers only trigger the most luminous active galactic nuclei. **The Astrophysical Journal**, American Astronomical Society, v. 758, n. 2, p. L39, Oct 2012. ISSN 2041-8213. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/758/2/L39>>.

URRUTIA, T.; LACY, M.; BECKER, R. H. Evidence for quasar activity triggered by galaxy mergers in observations of dust-reddened quasars. **The Astrophysical Journal**, Ame-

ican Astronomical Society, v. 674, n. 1, p. 80–96, Feb 2008. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/523959>>.

Urry, C. M.; Padovani, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 107, p. 803, set. 1995.

Véron-Cetty, M. P.; Véron, P. A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition. , v. 455, n. 2, p. 773–777, ago. 2006.

Winge, C.; Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T. The Gemini Spectral Library of Near-IR Late-Type Stellar Templates and Its Application for Velocity Dispersion Measurements. **The Astrophysical Journals**, v. 185, n. 1, p. 186–197, nov. 2009.

You, B.; Cao, X.; Yuan, Y.-F. A General Relativistic Model of Accretion Disks with Coronae Surrounding Kerr Black Holes. , v. 761, n. 2, p. 109, dez. 2012.