

Dissertação de Mestrado

Cinemática Bidimensional da Região Central das Galáxias Seyfert NGC 1068 e NGC 2110

Marlon R. Diniz

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Rogemar A. Riffel, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física da UFSM como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Física.

Santa Maria
2013

Cinemática Bidimensional da Região Central das Galáxias Seyfert NGC 1068 e NGC 2110

por

Marlon R. Diniz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física da UFSM
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Rogemar A. Riffel

Santa Maria, RS, Brasil, 2013

©2013

Todos os direitos reservados a Marlon R. Diniz.

A reprodução de parte ou do todo deste trabalho só poderá ser realizada com autorização por escrito do autor.

Endereço: Laboratório de Astrofísica e Eletrônica, Departamento de Física, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Faixa de Camobi, km 9, Santa Maria, RS, CEP 97105-900.

Telefone: +55(55)3220-9443, +55(55)9154-4397

E-mail: diniz.mr@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-graduação em Física

Cinemática Bidimensional da Região Central das Galáxias Seyfert NGC 1068 e NGC 2110

elaborado por

Marlon R. Diniz

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
MESTRE EM FÍSICA

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rogemar A. Riffel - Orientador, UFSM

Prof. Dr. Marcus Vinicius F. Copetti, UFSM

Prof. Dr. Roberto Bertoldo Menezes, IAG

Santa Maria, Julho de 2013.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que me apoiaram, incentivaram ou simplesmente me acompanharam até o final desta jornada, em particular

- ao professor Rogemar, pela orientação, incentivo e paciência durante esses anos de trabalho;
- à minha mãe Juraci, cuja paixão pelo seu trabalho me inspirou em seguir a carreira científica;
- à minha namorada, Ana Luiza por todo apoio e compreensão, essenciais para a realização deste trabalho;
- aos amigos e colegas de laboratório;
- à CAPES, pelo apoio financeiro.

Resumo

Neste trabalho, mapeamos bidimensionalmente a região central das galáxias ativas NGC 1068 e NGC 2110, a partir de observações no infravermelho próximo (IV) com o instrumento NIFS (*Near-infrared Integral Field Spectrograph*) do telescópio Gemini Norte. Para NGC 1068 apresentamos medidas da cinemática estelar a partir de ajustes das bandas de absorção do CO nas bandas H e K, com resolução espacial de ≈ 8 pc. Já para NGC 2110, a resolução espacial é ≈ 24 pc e utilizamos as absorções do CO na banda K para obter a cinemática estelar. Realizamos também medidas da cinemática e distribuições de fluxos para o gás molecular e para o gás ionizado, emissor de linhas na banda K.

Os campos de velocidades estelar para as duas galáxias apresentam um padrão de rotação típico, sendo bem representados por um modelo cinemático no qual as estrelas descrevem órbitas circulares no plano do disco e estão sujeitas a um potencial de Plummer. A massa do buraco negro supermassivo (BNS) no centro de NGC 1068 foi estimada como sendo $M_{\bullet} = 4.3_{-3}^{+6} \times 10^7 M_{\odot}$ a partir da relação $M_{\bullet} - \sigma_{*}$. Para NGC 2110, a massa do BNS foi estimada em $M_{\bullet} = 1.3_{-0.7}^{+2.5} \times 10^8 M_{\odot}$.

Os mapas para as distribuições de fluxos e cinemática do gás para NGC 2110 foram obtidos por ajustes de séries de Gauss-Hermite aos perfis das linhas de emissão do $H_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ e $H\text{I} \lambda 2.1661 \mu\text{m}$ (Br γ). Observa-se emissão estendida para o H_2 em todo o campo de observação, enquanto que a emissão de Br γ é estendida somente na direção sudeste–noroeste. A emissão H_2 é consistente com emissão de gás excitado por processos térmicos, tais como choques ou aquecimento do gás por raios-X emitidos pelos AGNs (*Active Galactic Nuclei*). Estimamos uma temperatura de excitação entre 2100 – 2700 K para o gás emissor de H_2 . Massas de gás ionizado e molecular foram estimadas a partir dos fluxos das linhas de emissão Br γ e $H_2 \lambda 2.1218$ e valem $M_{\text{HII}} \approx 1.7 \times 10^6 M_{\odot}$ e $M_{\text{H}_2} \approx 1.4 \times 10^3 M_{\odot}$, respectivamente.

Os campos de velocidades do gás apresentam um padrão de rotação típico, semelhante ao observado para as estrelas. Adicionalmente a este padrão de rotação observam-se diferentes componentes cinemáticas para o H_2 . São observadas duas estruturas em forma de espiral em *blueshifts* ao norte do núcleo e *redshifts* ao sul do mesmo. Assumindo que estas estruturas tem origem em emissão do gás no plano da galáxia elas podem ser interpretadas como escoamentos de gás em direção ao núcleo (*inflows*). Estimamos uma taxa de *inflow* de $\approx 4 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ano}^{-1}$. Outra componente cinemática observada para o H_2 foi interpretada como ejeção de gás do núcleo (*outflows*) com uma taxa de $\approx 4.66 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ano}^{-1}$.

Palavras-chave: AGNs; Espectroscopia de campo integral; Infravermelho; Dinâmica de galáxias.

Abstract

In this work, we present a two-dimensional mapping of the central region of the active galaxies NGC 1068 and NGC 2110, using near infrared integral field spectroscopy with the instrument NIFS (*Near-infrared Integral Field Spectrograph*) on the Gemini North Telescope. For NGC 1068, we present measurements for the stellar kinematics by fitting the CO absorptions in the H and K bands, at a spatial resolution of ≈ 8 pc. For NGC 2110 we used K band observations at a spatial resolution of ≈ 24 pc. Besides the stellar kinematics, we present flux distributions and kinematics for the molecular and ionized gas emission lines.

The stellar velocity fields for both galaxies present a typical rotation pattern, being well represented by a kinematic model, in which the stars have circular orbits in the plane of disk and are subject to a Plummer potential. The mass of the supermassive black hole in the center of NGC 1068 was estimated to be $M_{\bullet} = 4.3^{+6}_{-3} \times 10^7 M_{\odot}$ from $M_{\bullet} - \sigma_{\star}$ relation. For NGC 2110, M_{\bullet} was estimated to be $M_{\bullet} = 1.3^{+2.5}_{-0.7} \times 10^8 M_{\odot}$.

The maps for the kinematics and flux distributions of the emitting gas for NGC 2110 were obtained by fitting the $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ and $\text{H I } \lambda 2.1661 \mu\text{m}$ emission-line profiles by Gauss-Hermite series. The H_2 presents extended emission in the whole field of observation, while the $\text{Br}\gamma$ is extended only in the southeast – northwest direction. The H_2 emission is consistent with emission of gas excited by thermal processes, such as gas heated by X-rays from the AGN or shocks. We estimated an excitation temperature of $\approx 2100 - 2700$ K for H_2 emitting gas. The masses of molecular and ionized gas were estimated from fluxes of the $\text{H}_2 \lambda 2.1218$ and $\text{Br}\gamma$ emission lines as $M_{\text{H}_2} \approx 1.4 \times 10^3 M_{\odot}$ and $M_{\text{HII}} \approx 1.7 \times 10^6 M_{\odot}$, respectively.

The gas velocity fields present a rotation pattern similar to those observed for the stars. In addition, the H_2 velocity field presents other kinematic components. Two spiral structures are observed in blueshifts to the north of the nucleus and redshifts to the south of it. If these kinematic structures are originated from emission of gas located in the plane of the galaxy, they can be interpreted as gas flow towards the nucleus (inflow) of the galaxy along the spiral arms. In this case, the mass inflow rate is estimated to be $\approx 4 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Another kinematic component observed for H_2 emitting gas was interpreted as ejection of gas from the nucleus (outflow) within a bi-cone with a mass outflow rate of $\approx 4.66 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$.

Keywords: AGNs; Integral Field Spectroscopy; Infrared; Dynamics of galaxies.

Sumário

1	Introdução	6
1.1	Galáxias ativas	7
1.2	A classe de Galáxias Seyfert	9
1.3	Cinemática estelar	12
1.4	Cinemática do gás	12
1.4.1	A emissão do H ₂	13
1.5	Biblioteca de templates	14
1.6	Objetivos do trabalho	16
2	Obtenção e redução dos dados: NGC 1068 e NGC 2110	18
2.1	NGC 1068	18
2.2	NGC 2110	20
2.3	O instrumento NIFS	20
2.4	Observações	21
2.5	Redução de dados	22
2.5.1	<i>Flat-field</i>	23
2.5.2	Corrente de escuro	24
2.5.3	Imagens <i>ronchi</i>	24
2.5.4	Lâmpada de ArXe	25
2.5.5	Estrelas padrão telúricas	25
2.5.6	Calibração em fluxo	26
2.5.7	O Cubo de dados	26
2.5.7.1	Resolução espectral	26
2.5.7.2	Resolução espacial	27

2.6	Procedimento de redução de dados	27
3	Metodologia	30
3.1	Cinemática estelar	30
3.2	Ajustes dos perfis das linhas de emissão	31
3.3	Mapas de fluxo em diferentes velocidades – <i>Channel maps</i>	34
3.4	Modelo cinemático	34
4	Resultados: NGC 1068	35
4.1	Cinemática estelar	36
5	Resultados: NGC 2110	44
5.1	Cinemática estelar	46
5.2	A emissão do gás	48
5.3	<i>Channel maps</i>	51
6	Discussões: NGC 1068	54
6.1	Cinemática estelar	54
6.2	Massa do buraco negro supermassivo	56
6.3	Modelo cinemático	57
7	Discussões: NGC 2110	58
7.1	Cinemática estelar	58
7.2	Excitação do gás	59
7.3	Massa do gás molecular e massa do gás ionizado	62
7.4	Cinemática do gás	63
7.4.1	Taxa de <i>inflow</i>	65
7.4.2	Taxa de <i>outflow</i>	65
7.4.3	Taxa de acreção	66
8	Considerações finais	68
8.1	Conclusões	68
8.2	Perspectivas	69

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática do Modelo Unificado de AGNs	8
1.2	Espectro de uma galáxia do tipo Seyfert 1	11
1.3	Espectro de uma galáxia do tipo Seyfert 2	11
1.4	Espectros estelares na banda K	15
1.5	Espectros estelares na banda H	16
2.1	Ilustração do princípio do AIS equipado com três <i>slices</i>	22
2.2	Imagem <i>flat-field</i> típica obtida com o NIFS	23
2.3	Imagem da máscara de <i>ronchi</i> obtida com o NIFS	24
2.4	Imagem da lâmpada padrão – ArXe	25
3.1	Comparação entre ajustes de gaussianas e Gauss-Hermite	33
4.1	Imagem em grande escala da galáxia NGC 1068	35
4.2	Espectros na banda H da galáxia NGC 1068	37
4.3	Espectros na banda K da galáxia NGC 1068	38
4.4	Mapas da cinemática estelar na banda K para NGC 1068	39
4.5	Cinemática estelar na banda H para NGC 1068	40
4.6	Ajustes das absorções do CO com o método pPXF	41
4.7	Cinemática estelar da galáxia NGC 1068, com as bandas H e K combinadas	42
4.8	Mapas de h_{3^*} e h_{4^*} para a galáxia NGC 1068	43
5.1	Imagem em grande escala da galáxia NGC 2110	44
5.2	Espectros na banda K da galáxia NGC 2110	45
5.3	Campo de velocidades e dispersão de velocidades estelar da galáxia NGC 2110	47
5.4	Momentos de Gauss-Hermite da galáxia NGC 2110	48

5.5	Medidas de fluxos para as linhas de emissão do $H_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ e $Br \gamma \lambda 2.1661 \mu\text{m}$. . .	49
5.6	Medidas do campo de velocidades radiais para as linhas de emissão do $H_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ e $Br \gamma \lambda 2.1661 \mu\text{m}$	50
5.7	Medidas da dispersão de velocidades de emissão do $H_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$, e $Br \gamma \lambda 2.1661 \mu\text{m}$	51
5.8	Medidas dos momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4	52
5.9	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do $H_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$	53
5.10	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do $Br \gamma$	53
6.1	Cortes unidimensionais ao longo do eixo menor ($PA = -10^\circ$) e maior ($PA = 80^\circ$) de NGC 1068	55
6.2	Modelo cinemático da galáxia NGC 1068	57
7.1	Modelo cinemático da galáxia NGC 2110	59
7.2	Gráfico da temperatura de excitação do H_2	61
7.3	Mapa da razão entre as intensidades das linhas de emissão do $H_2 \lambda 2.1218$ e do $Br \gamma$.	61
7.4	Mapas de resíduos do H_2 e $Br \gamma$	64

Lista de Tabelas

5.1	Fluxos das linhas de emissão detectadas a $0.7''$ ao norte e $0.4''$ ao sudeste do núcleo. .	46
7.1	Massas de gás, taxas de <i>inflow</i> em H_2 morno e taxas de <i>outflow</i> do gás ionizado . . .	66

Capítulo 1

Introdução

Por volta de cem anos atrás, uma das questões que intrigava os astrônomos era a natureza das nebulosas que, devido às suas distâncias, pareciam manchas opacas nos confins do universo e nenhum telescópio, já então construído, era capaz de resolvê-las. Mesmo com mais de 15 mil nebulosas catalogadas até 1908 e, mais tarde, com a inauguração dos telescópios de 1.5 e 2.5 metros no Observatório do Monte Wilson, a natureza desses objetos era um verdadeiro mistério. Em 1918, quando Hubble retornou da guerra e iniciou seus estudos sobre elas, as dúvidas ainda existiam. A questão da natureza das nebulosas gerou um debate entre dois astrônomos na cidade de Washington, em 1920. Um deles, nada menos que o diretor do observatório de Harvard e que trabalhou de 1914 até 1921 no Observatório do Monte Wilson, Harlow Shapley defendia a ideia da existência de apenas a nossa galáxia e, portanto, as nebulosas, por mais distantes que estivessem, ainda fariam parte dela. Enquanto que Herbert D. Curtis defendia a ideia de que as nebulosas espirais eram “universos ilhas”, e portanto, semelhantes à Via Láctea. Ao final do debate nenhum dos dois participantes havia conseguido convencer seu adversário. Então, em 1924, Edwin Hubble escreveu uma carta a Shapley comunicando-lhe que descobrira uma estrela Cefeida na nebulosa de Andrômeda. Cefeidas são estrelas variáveis que apresentam uma relação entre período e luminosidade e, por isso, servem para medir distâncias no universo. A distância até a estrela variável determinaria se Andrômeda pertenceria ou não às fronteiras da Via Láctea. Andrômeda está em torno de 2.5 milhões de anos luz da Terra, muito além dos limites da nossa galáxia. Curtis estava certo, existem outros mundos, “universos ilhas”, separados por distâncias, até então, inimagináveis. Ainda hoje, novas galáxias são descobertas por telescópios e instrumentos construídos pelo homem. Estudos sobre as diferentes classes de galáxias fornecem respostas sobre a estrutura e evolução do universo.

1.1 Galáxias ativas

Dentre as galáxias observadas no universo, há um grupo que apresenta comportamentos comuns relacionados à alta produção de energia em seus núcleos. Acredita-se que sua intensa produção de energia ocorra devido à existência de um buraco negro supermassivo (BNS) central, o qual está, de alguma forma, atraindo matéria da vizinhança e convertendo-a em radiação. Tais objetos são chamados de galáxias ativas, por possuírem um núcleo ativo de galáxia (AGN). Galáxias desse tipo emitem tanta energia da região central que é possível comparar tal energia com o brilho emitido por todas as estrelas da própria galáxia. Algumas características desses objetos são (Peterson, 1997):

- Energia produzida em escalas menores que 1 parsec¹.
- Luminosidade $\gtrsim 10^{11} L_{\odot}$ ², que pode ser comparada à emissão da radiação de todas as estrelas da galáxia.
- A emissão do contínuo está associada a processos não-térmicos, ou seja, de natureza não estelar, como por exemplo, radiação sincrotrônica.
- O contínuo e as linhas de emissão variam rapidamente em intervalos curtos de tempo (escalas de dias).
- Presença de linhas de emissão permitidas muito largas ($> 10\,000 \text{ km s}^{-1}$) nos espectros de alguns AGNs.

Acredita-se que a origem da energia em AGNs seja devido à presença de um BNS com massa entre 10^6 e $10^9 M_{\odot}$ ³, localizado no centro dessas galáxias. Correlações entre propriedades do bojo das galáxias (como luminosidade e dispersão de velocidades) e a massa do BNS sugerem que todas as galáxias que possuem uma componente estrutural esferoidal também possuem um BNS em seu centro (Ferrarese; Merritt, 2000; Gebhardt et al., 2000). O BNS acreta matéria das vizinhanças e torna-se cada vez mais massivo. O aumento de sua massa se dá de maneira proporcional ao crescimento do bojo (Ferrarese; Ford, 2005; Tremaine et al., 2002). Portanto, a única diferença entre galáxias normais e ativas é que nas segundas o BNS está acretando matéria e nas primeiras não, porque, possivelmente, não há matéria disponível na vizinhança do núcleo.

Os AGNs são interpretados em diferentes tipos a partir de características espectroscópicas e de três parâmetros fundamentais: (1) a **luminosidade**, (2) a **orientação** do AGN em relação à nossa

¹ 1 parsec (pc) corresponde a 3.086×10^{16} m.

² L_{\odot} é definido como a luminosidade solar e vale 8.826×10^{26} W ou 4.0×10^{33} erg s⁻¹.

³ M_{\odot} é definido como sendo uma massa solar e equivale a 1.99×10^{30} kg.

linha de visada e (3) a **intensidade do jato rádio** emitida pelo núcleo da galáxia. Dessa maneira, podemos dividi-los em Seyferts, Quasares (Quasi-stellar radio sources), Rádio Galáxias, LINERS (Low-Ionization Nuclear Emission-line Regions) e Blazares. A partir do Modelo Unificado de AGNs (Antonucci, 1993; Urry; Padovani, 1995), podemos diferenciar as classes de AGNs de acordo com variações dos parâmetros acima.

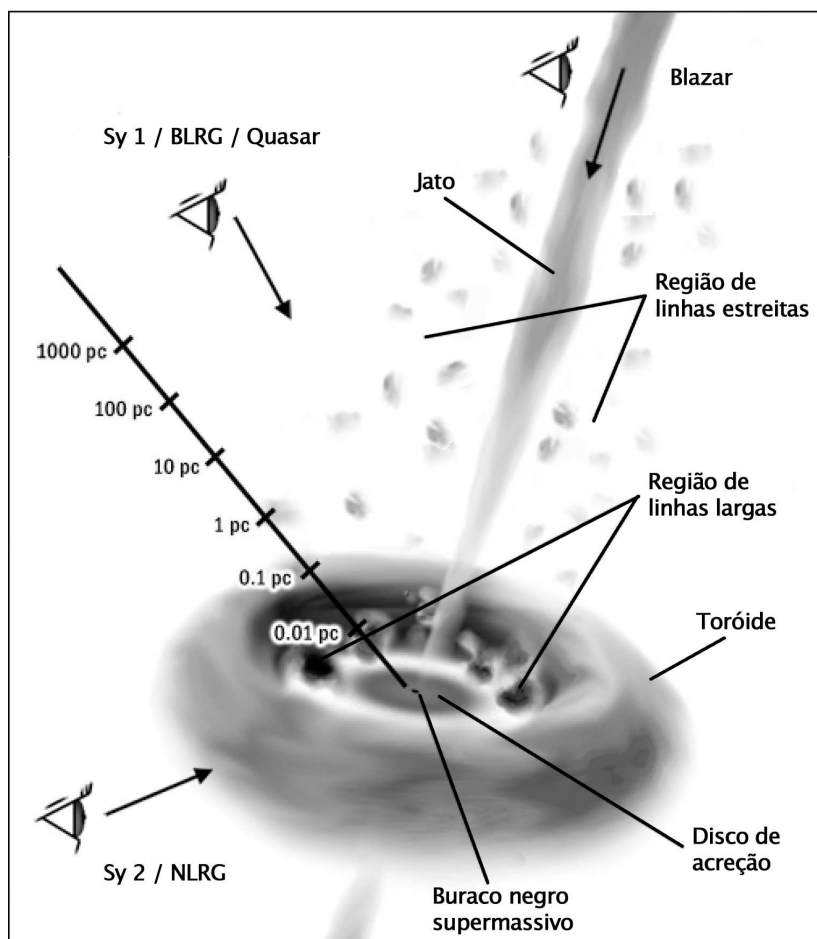


Figura 1.1: Representação esquemática do Modelo Unificado de AGNs.

Na Figura 1.1 está representado o esquema do Modelo Unificado de AGNs que mostra um disco de acreção ao redor do BNS central, um toróide denso molecular que circunda o disco de acreção, região de formação de linhas estreitas estendidas e distantes do toróide, região de formação de linhas largas localizadas no interior do toróide, o jato emitido da parte interna do disco de acreção em direções opostas e as classes de AGNs. Segundo o modelo, a região onde são produzidas as linhas largas (BLR - *Broad Line Region*) são internas ao toróide. Assim, em galáxias em que não podemos enxergar tal região, detectamos somente a região onde são produzidas linhas estreitas (NLR - *Narrow Line Region*) as quais são mais estendidas e, portanto, não sofrem obscurecimento do toróide. Por

exemplo, em uma Seyfert do tipo 1 (Sy 1) detectamos as regiões das linhas largas e estreitas, enquanto em uma Seyfert do tipo 2 (Sy 2) apenas linhas estreitas são detectadas. As Rádio Galáxias são subdivididas em BLRG (*Broad Line Radio Galaxies*) que apresentam linhas largas em seus espectros e NLRG (*Narrow Line Radio Galaxies*) que apresentam apenas linhas estreitas em seus espectros. Em outras palavras, as *Broad Line Radio Galaxies* e as *Narrow Line Radio Galaxies* são as análogas emissoras de rádio das galáxias Seyfert 1 e Seyfert 2, respectivamente. Nos Quasares também observamos a região de formação de linhas largas, entretanto, a principal diferença está na luminosidade que é 100 vezes maior nos Quasares (Peterson, 1997) e os extensos jatos rádio observados nas Rádio Galáxias. Quando nossa linha de visada aponta diretamente para um jato observamos um Blazar.

Estudos e simulações cosmológicas de evolução de galáxias mostram que as galáxias atuais teriam valores maiores para suas massas se não fosse considerado um buraco negro supermassivo em seus núcleos (Springel; Di Matteo; Hernquist, 2005; Di Matteo; Springel; Hernquist, 2005; Bower et al., 2006). Isso ocorre porque, provavelmente, durante a fase de evolução das galáxias e, consequentemente do BNS, esse último alimenta-se do material a sua volta produzindo, periodicamente, jatos de partículas e ventos do disco de acreção. Esses jatos se estendem a grandes distâncias do núcleo e freiam o crescimento da galáxia por impedir a acreção de gás extragalático nas fases em que a galáxia está ativa.

Portanto, estudos sobre propriedades físicas de BNS e de galáxias ativas são de grande importância, pois, tem um papel fundamental no entendimento do processo de evolução das galáxias e do nosso próprio universo. Neste trabalho estudamos duas galáxias classificadas como Seyfert do tipo 2 e algumas características desses objetos são descritas na próxima seção.

1.2 A classe de Galáxias Seyfert

No início do século XX, quando o astrônomo E. A. Farth, do Observatório Lick, analisava o espectro da “nebulosa” NGC 1068 e observou que ele apresentava linhas de emissão mais largas (algumas centenas de km s^{-1}) quando comparadas com espectros de outras “nebulosas”. Naquela época ainda não havia certeza da existência de outras galáxias além da nossa e objetos que se parecessem com nuvens eram denominados “nebulosas”, hoje sabemos que muitas delas são, de fato, galáxias.

Quase quatro décadas depois, em 1943, o pesquisador Carl Seyfert percebeu que havia diversas galáxias com propriedades semelhantes àquelas encontradas por E. A. Farth em 1908. A partir daí Seyfert definiu um grupo de galáxias com aspectos diferentes daqueles atribuídos às galáxias normais, elaborando assim uma divisão entre galáxias normais e ativas. A classe das galáxias Seyfert pertence ao grupo das galáxias ativas e pode ser subdividido em Seyfert do tipo 1 (Sy 1) e Seyfert do tipo 2 (Sy 2).

Em uma Sy 1 nossa linha de visada é tal que enxergamos a BLR, onde a densidade de matéria é maior que 10^9 elétrons por cm^3 (Osterbrock; Ferland, 2006). O brilho de seu núcleo ofusca o brilho das estrelas da galáxia e detecta-se uma emissão no contínuo que cobre a faixa espectral desde os raios-X até o infravermelho (IV) distante. Os espectros dessas galáxias, como o mostrado na Figura 1.2, apresentam linhas permitidas muito largas, como por exemplo as linhas do H I, H II, He I e He II. Tais linhas são formadas na BLR onde há maior turbulência e quantidade de gás, o que contribui para o alargamento da linha. Além disso, as grandes larguras das linhas emitidas na BLR decorrem de um efeito Doppler diferencial gerado pelo fato de que o gás emissor encontra-se em altas velocidades. Entretanto, o movimento exato realizado por esse gás em altas velocidades ainda é motivo de debate na literatura. Osterbrock e Ferland (2006) defendem a hipótese de que o gás na BLR deve realizar um movimento rotacional em altas velocidades, sendo que também pode haver um *outflow* de material nas regiões mais próximas à fonte central. Medidas da largura a meia altura (FWHM) dos perfis dessas linhas resultam valores da ordem de $10\,000\text{ km s}^{-1}$. Na região de formação de linhas estreitas detecta-se emissão tanto de linhas permitidas quanto proibidas, como por exemplo, linhas do [O III], [S II], [N II] e [Fe II], as linhas estreitas (proibidas ou permitidas) detectadas apresentam FWHM de $\approx 500\text{ km s}^{-1}$ e a densidade eletrônica típica de $10^3 - 10^4\text{ cm}^{-3}$. Na Figura 1.2, mostramos um espectro da banda K para a galáxia Sy 1 Mrk 1066, onde observa-se a componente larga na linha Br γ .

Quando nossa orientação é tal que não detectamos linhas largas no núcleo dizemos que a galáxia é uma Sy 2. Portanto, em galáxias desse tipo detectamos, na maioria das vezes, apenas linhas de emissão estreitas, as quais podem ser permitidas ou proibidas e apresentam valores para FWHM de $\approx 500\text{ km s}^{-1}$ (Osterbrock; Ferland, 2006). Na Figura 1.3 apresentamos o espectro, obtido na região do IV, de uma galáxia classificada como uma Sy 2. Nesse espectro todas as linhas de emissão apresentam somente a componente estreita. Entretanto, a partir de observações polarimétricas são detectados perfis de linhas de emissão com larguras maiores que $3\,000\text{ km s}^{-1}$ em algumas galáxias Sy 2, como por exemplo, em NGC 1068 (Antonucci; Miller, 1985). Outras galáxias Seyfert do tipo 2 também apresentam perfis alargados. No estudo de Miller e Goodrich (1990) a metade das galáxias classificadas como Sy 2 apresentou espectros com perfis mais largos (Mrk 3, Mrk 348, Mrk 463E e NGC 7674). Esses e outros resultados dão suporte ao esquema do Modelo Unificado no sentido de que temos, realmente, o mesmo objeto sendo observado, e só não detectamos a região de formação de linhas largas porque nossa linha de visada é encoberta por algum tipo de toróide de poeira que bloqueia, praticamente, toda a radiação emitida da região de formação de linhas largas.

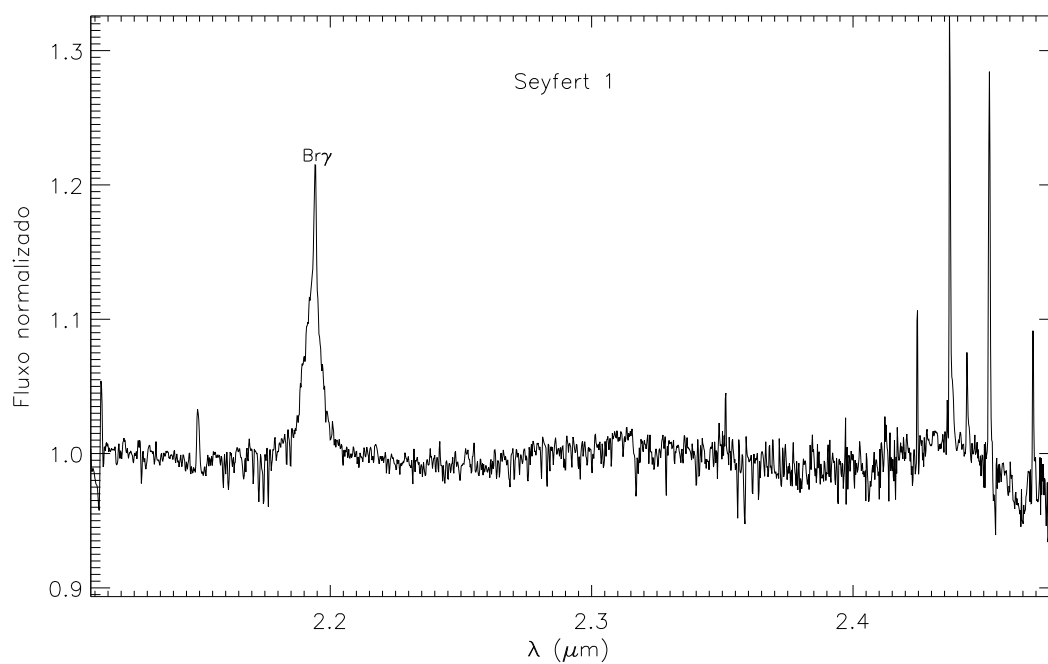


Figura 1.2: Espectro nuclear de uma galáxia classificada como Sy1.

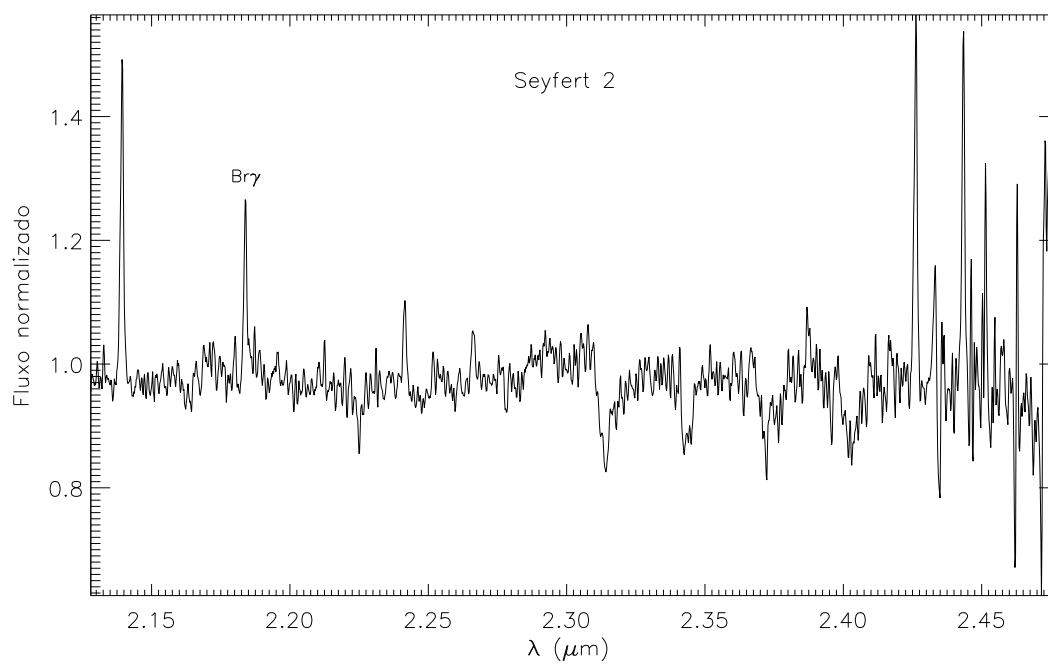


Figura 1.3: Espectro de uma galáxia classificada como Sy2.

1.3 Cinemática estelar

O modelo atual da evolução de galáxias aponta que todas aquelas que possuem um bojo têm um BNS em seu centro. Quando estudamos objetos desse tipo estamos interessados em descobrir “como” e “por quem” o BNS é alimentado durante as fases em que a galáxia está ativa, por que sua massa é proporcional a massa do bojo estelar e obter informações sobre seu potencial gravitacional. Mas, medidas da cinemática estelar em galáxias ativas são mais difíceis de se obter do que em galáxias normais, simplesmente, porque nas primeiras há tanto brilho que a emissão nuclear ofusca o brilho das estrelas na região central da galáxia. Além disso, galáxias com núcleo ativo estão em média mais distantes do que galáxias normais. (Tremaine et al., 2002; Gebhardt et al., 2003; Ferrarese; Ford, 2005).

Medidas de razões entre massa e luminosidade de galáxias Seyfert, cobrindo uma região da ordem de quiloparsecs, têm valores menores do que galáxias normais, devido, possivelmente, à presença de uma população estelar mais jovem ao redor do núcleo. Valores das razões massa – luminosidade para AGNs, a partir da análise das bandas do CO (1.62 – 2.29 μm) e do Si (1.59 μm) no infravermelho próximo, indicam que essa banda de absorção é um ótimo mecanismo para diferenciar a presença de estrelas do tipo super-gigantes vermelhas e de gigantes vermelhas (Oliva et al., 1995).

Estudos da cinemática estelar em galáxias ativas numa região de até 50 pc do núcleo mostram que, em algumas delas, a dispersão de velocidades estelar (σ_*) apresenta uma queda ($\sigma_* - drop$) em regiões próximas ao núcleo (Emsellem et al., 2001; Márquez et al., 2003). Esse $\sigma_* - drop$, possivelmente, ocorre devido a um disco nuclear frio que teria recentemente formado novas estrelas, as quais ainda não possuem o mesmo campo de velocidades das estrelas do bojo (Emsellem et al., 2001). Essa interpretação está de acordo com um cenário evolutivo que vem sendo proposto com base em estudos das populações estelares no entorno de núcleos Seyfert (Schmitt; Storchi-Bergmann; Cid Fernandes, 1999; Cid Fernandes et al., 2001; Storchi-Bergmann et al., 2000, 2001) e da sua relação com o ambiente da galáxia hospedeira (Storchi-Bergmann et al., 2001; Riffel et al., 2011).

Em galáxias o estudo da sua cinemática estelar, em escalas de dezenas de parsecs, permite uma análise mais robusta no que diz respeito a medidas da massa de buracos negros, estudos do potencial gravitacional e distribuição de massa nas galáxias.

1.4 Cinemática do gás

Mapear o gás em regiões próximas ao núcleo, através da espectroscopia de campo integral no IV, nos permite investigar, de maneira eficaz, a interação do AGN com o ambiente ao seu redor. Estudos

dessa magnitude nos fornecem resultados robustos sobre a cinemática, distribuição e excitação do gás e mostram que, em geral, sua cinemática na vizinhança do núcleo tem componentes que diferem da rotação pura do disco da galáxia. Trabalhos dessa natureza revelam que, em regiões com tamanhos de alguns quiloparsecs ao redor do núcleo, o gás molecular e o gás ionizado apresentam cinemáticas e distribuições de fluxos distintas (Storchi-Bergmann et al., 2000; Riffel et al., 2006, 2008; Davies et al., 2007; Müller-Sánchez et al., 2011).

Na região de formação das linhas estreitas, estudos no ultravioleta (UV), óptico e IV, a respeito da excitação e cinemática do gás fornecem evidências de como se dá sua interação com a radiação e ejeções de matéria provenientes da fonte central. Em Wilson et al. (1993), com observações óticas do HST, os autores mapearam o jato rádio e uma estrutura em forma de bicone na galáxia NGC 5728 com algumas centenas de parsecs de extensão. Estudos no UV e óptico sobre a geometria e interação do jato rádio com a NLR detectam estruturas cônicas e emissões estendidas do mesmo para a maioria das galáxias Seyfert (Capetti et al., 1996). Em imagens no óptico e rádio também observa-se que a distribuição dos fluxos se parece com estruturas densas com algumas dezenas de parsecs que envolvem os jatos rádios (Falcke et al., 1996; Falcke; Wilson; Simpson, 1998). A interação do jato rádio com o gás a sua volta, além de afetar sua distribuição de fluxos, também influencia o seu movimento orbital (Winge et al., 1997, 1999; Axon et al., 1998).

Enquanto o gás ionizado está associado, na maioria das vezes, a ejeções de matéria (*outflows*), por causa de sua interação com o jato rádio (Gerssen et al., 2006; Riffel et al., 2006, 2008, 2009; Riffel; Storchi-Bergmann, 2011a; Storchi-Bergmann et al., 2009, 2010), a cinemática do gás molecular é dominada por rotação, a qual, geralmente, está associada a *inflows*, que representa matéria fluindo em direção ao núcleo (Fathi et al., 2006; Storchi-Bergmann et al., 2007, 2009; Müller-Sánchez et al., 2009; Riffel et al., 2008; Riffel; Storchi-Bergmann, 2011a, 2011b; Schnorr Müller et al., 2011; Müller; Storchi-Bergmann; Nagar, 2012).

Estudos detalhados da cinemática do gás em regiões próximas ao núcleo de galáxias ativas nos proporcionam compreender, de maneira mais clara, os processos físicos envolvidos na alimentação do AGN, o que permite a construção de modelos de evolução de galáxias mais confiáveis.

1.4.1 A emissão do H₂

Uma molécula está num nível excitado de energia devido à soma de seus movimentos de translação, vibração e rotação, que estão associados aos diversos valores de energia da molécula. Os níveis de energia eletrônicos ou translacionais estão relacionados com o número quântico n , os vibracionais são caracterizados pelo número quântico v e os rotacionais estão relacionados ao momento angular J e ao número quântico ℓ .

Para os primeiros níveis de energia vibracional, a excitação de vibração de um nível para outro imediatamente superior é constante $\Delta E = hf$ e exige cerca de $6 \times 10^{-20} \text{ J}$ ⁴. Um fóton com essa energia tem um comprimento de onda $\lambda = 3 \mu\text{m}$, logo, detectado em espectros no IV. Portanto, as linhas de emissão do H_2 detectadas no IV resultam de transições vibracionais.

Linhas de emissão do H_2 estão presentes em diferentes regiões das galáxias, inclusive nas proximidades da região central de AGNs. As emissões do H_2 podem ser produzidas por processos térmicos e não-térmicos. Os primeiros, ocorrem devido a excitações colisionais por choques e pelo aquecimento do gás devido à interação do jato rádio com o meio interestelar (Hollenbach; McKee, 1989) ou devido à emissão de raios-X proveniente do AGN central (Maloney; Hollenbach; Tielens, 1996). Os segundos, decorrem da absorção de fótons no UV ($912 - 1108 \text{ \AA}$) nas bandas Lyman and Werner (Black; van Dishoeck, 1987). Para diferenciar a excitação colisional de excitação fluorescente, na banda K, é comum utilizar razões de linhas do H_2 . Valores entre $\sim 0.1 - 0.2$ para a razão das linhas $\text{H}_2 \lambda 2.2477 / \lambda 2.1218$ indicam que o mecanismo de excitação é térmico, enquanto que valores em torno de ~ 0.55 correspondem a emissão devido a fluorescência (Reunanen; Kotilainen; Prieto, 2002; Rodríguez-Ardila; Riffel; Pastoriza, 2005). Outra possibilidade para identificar o mecanismo de excitação do H_2 é através da razão das linhas $\text{H}_2 \lambda 2.1218 / \text{Br}\gamma$. Valores menores que 0.6 indicam que a emissão do gás é devido a fluorescência e valores entre $0.6 - 2.0$ correspondem a emissão térmica (Riffel et al., 2006).

1.5 Biblioteca de templates

Medidas da cinemática estelar em galáxias são obtidas a partir do ajuste de absorções estelares presentes nos espectros da galáxia, utilizando bibliotecas de templates estelares que sejam representativas das estrelas da galáxia, ou seja, devem haver absorções em comum entre os espectros da galáxia e das estrelas da biblioteca.

A maioria das galáxias observadas na banda K, na região do IV, apresentam proeminentes bandas de absorção de $\text{CO}(2,0) \lambda 2.2935 \mu\text{m}$ e $\text{CO}(3,1) \lambda 2.3227 \mu\text{m}$. Esse fato levou, num primeiro momento, a criação de uma biblioteca espectral de estrelas de tipo tardio utilizando absorções no IV com o Telescópio Gemini (Winge; Riffel; Storchi-Bergmann, 2009). Originalmente essa biblioteca continha 40 espectros de estrelas de tipo tardio, obtidos a partir de observações no IV com a unidade de campo integral (IFU) do instrumento GNIRS e com o instrumento NIFS (que é uma IFU), os quais estão instalados no Telescópio Gemini Sul e Gemini Norte, respectivamente.

⁴Valor obtido com a equação clássica do movimento harmônico e a constante de força de uma ligação química com valor típico de 500 N m^{-1} .

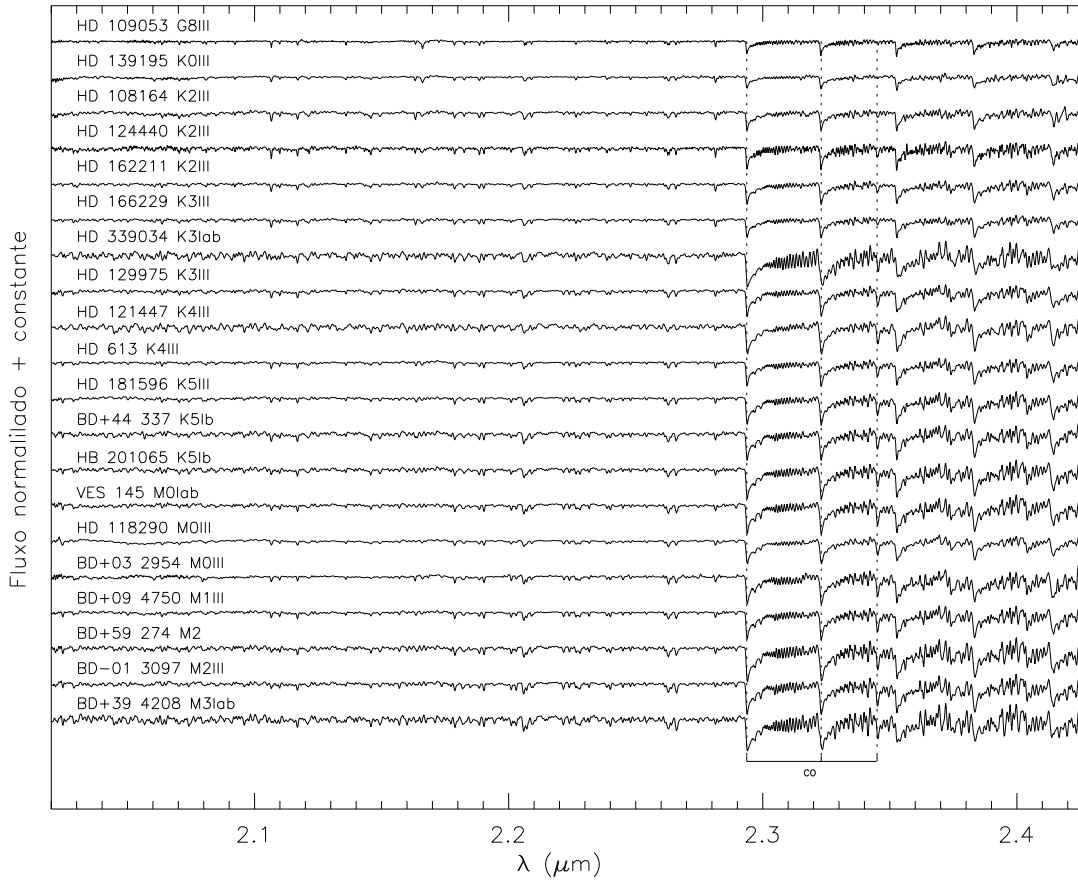


Figura 1.4: 20 espectros estelares, na banda K, adicionados à biblioteca de Winge, Riffel e Storchi-Bergmann (2009).

Em 2011 foram adicionados 20 espectros estelares (Diniz, 2010) cobrindo a mesma faixa espectral da biblioteca original. Os dados foram obtidos com o instrumento NIFS do Telescópio Gemini Norte e fazem parte dos projetos identificados como GN-2006A-C-11, GN-2007A-Q-45 e GN-2007A-Q-62, os quais são públicos na base de dados do Observatório Gemini. A biblioteca passou a ter 60 espectros de estrelas de tipo tardio, desde o tipo F7 até M3, com resolução espectral de $\approx 3.3 \text{ \AA}$ e cobrindo uma faixa de $2.1 - 2.45 \mu\text{m}$. Além do aumento de 50% do número de espectros da biblioteca original a sua ampliação também supriu uma carência em relação a estrelas do tipo M, que passaram de 6 para 13. Os templates estelares estão disponíveis no banco de dados do Observatório Gemini. Na Figura 1.4 apresentamos os 20 espectros das estrelas adicionados a biblioteca original.

No presente trabalho também utilizamos dados públicos do banco de dados do Observatório Gemini para elaborar uma biblioteca de templates com 5 espectros de estrelas de tipo tardio cobrindo um intervalo espectral de $1.49 - 1.66 \mu\text{m}$, correspondente à banda H. Na Figura 1.5 mostramos os 5 espectros estelares e também o espectro do núcleo da galáxia NGC 1068. A grande vantagem de se ter um número maior de espectros estelares de diferentes tipos espectrais como templates em medidas de

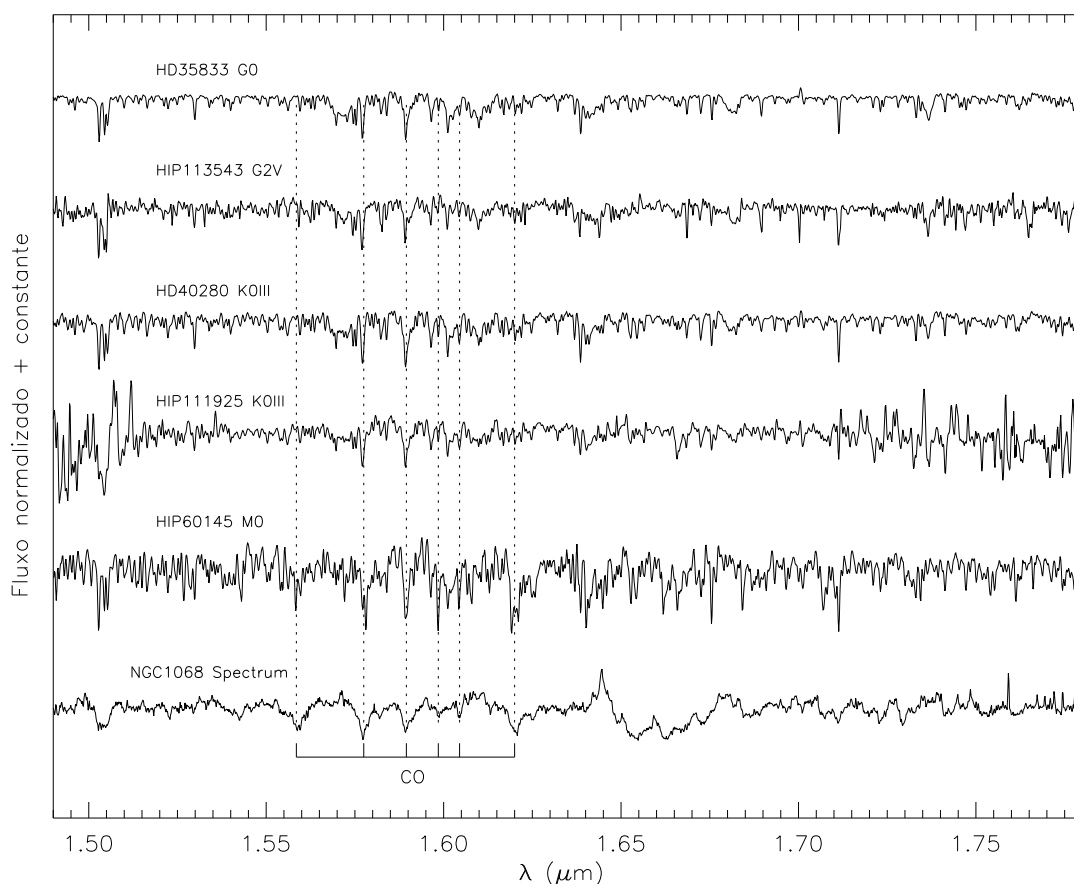


Figura 1.5: Os 5 primeiros espectros correspondem a espectros estelares obtidos com o NIFS e por último tem-se um espectro nuclear da galáxia NGC 1068 na banda H.

dispersão de velocidades é que valores médios de σ_* apresentam grandes diferenças daqueles medidos utilizando apenas estrelas individuais (Riffel et al., 2008).

1.6 Objetivos do trabalho

Como já mencionamos, estudos a respeito de buracos negros supermassivos fornecem uma melhor compreensão sobre a evolução do universo, pois, segundo a cosmologia, todas galáxias normais já foram ativas em algum instante desde sua formação. A investigação de AGNs na faixa espectral do IV é um excelente meio para estudar os fenômenos físicos existentes em regiões próximas ao núcleo, pois efeitos de absorção e espalhamento da radiação pela poeira são menores nessa região espectral do que, por exemplo, no óptico. Desse modo, estudos com o NIFS de galáxias ativas são essenciais para literatura uma vez que trabalhos desse tipo ainda são escassos. Neste trabalho nossos principais objetivos são:

- Utilizar o instrumento NIFS do Telescópio Gemini Norte para estudar a cinemática estelar da região central das galáxias NGC 1068 e NGC 2110.
- Mapear a cinemática do gás da galáxia NGC 2110 e verificar a presença de *inflows* e *outflows* de matéria a partir do núcleo.
- Investigar a distribuição de fluxos e a origem das principais linhas de emissão presentes na banda K para NGC 2110.
- Calcular a massa de gás molecular e gás ionizado na região central de NGC 2110.
- Estimar a massa do buraco negro supermassivo para ambas as galáxias.

Este trabalho está organizado da seguinte forma o Cap. 2 apresenta uma descrição sobre os objetos analisados, as observações e as etapas executadas para a redução dos dados. No Cap. 3 mostramos a metodologia adotada e apresentamos os resultados da cinemática estelar da galáxia NGC 1068 no Cap. 4. Mostramos os resultados para a cinemática estelar, distribuições de fluxos e cinemática do gás molecular e ionizado em NGC 2110 no Cap. 5. Nos Capítulos 6 e 7, discutimos os resultados obtidos e no Cap. 8 expomos nossas conclusões e perspectivas.

Capítulo 2

Obtenção e redução dos dados: NGC 1068 e NGC 2110

Escolhemos duas galáxias classificadas como Sy 2 que estão situadas próximas à Via-Láctea, distantes apenas algumas dezenas de milhões de parsecs. Ambas apresentam características espectrais no IV que nos permitem mapear tanto a cinemática das estrelas quanto a do gás. Esses objetos fazem parte de uma amostra maior, em torno de 30 AGNs, que nosso grupo pretende observar com unidades de campo integral no IV a fim de mapear detalhes da região central desse tipo de objetos. A seguir descrevemos algumas características e propriedades das galáxias escolhidas e também o processo de aquisição e redução dos dados.

2.1 NGC 1068

NGC 1068 é uma galáxia espiral do tipo SAb com um núcleo ativo classificado como Seyfert 2, situada a 14.4 Mpc, com uma relação de $1''$ para cada 70 pc. Há inúmeros estudos desde a faixa espectral dos raios-X até ondas de rádio sobre a NGC 1068.

Assim como outras galáxias Sy 2, a NGC 1068 apresenta uma estrutura bicônica orientada ao longo do jato rádio isso significa que a radiação é mais colimada em direção ao cone, ou seja, deve haver algo perto da região central atuando como agente colimador da radiação emitida da fonte central. Esse resultado concorda com a ideia do toróide de poeira previsto no Modelo Unificado (Antonucci, 1993; Urry; Padovani, 1995). Quando apontamos o telescópio para a região central de uma galáxia classificada como Seyfert 2 e detectamos a luz polarizada, o que a está polarizando é um meio espalhador acima e abaixo do toro de poeira. Esse meio espalhador (possivelmente formado por elétrons livres) espalha a luz proveniente da BLR em nossa direção, provocando também a polarização dessa luz. É esse espalhamento que nos permite detectar a existência de componentes largas de linhas de emissão

em galáxias Sy 2.

Em Macchetto et al. (1994) verificou-se que imagens do contínuo na faixa do UV são semelhantes às imagens de banda estreita do [O III], observadas no óptico. Esses resultados são consistentes com a interpretação de que a emissão UV tem origem em espalhamento da luz do núcleo por poeira, apoiado pelo fato de que essa luz apresenta grande polarização. A descoberta dessa luz polarizada indica que o Modelo Unificado está correto (Antonucci; Miller, 1985).

No trabalho de Emsellem et al. (2006), com observações óticas do espectrógrafo de campo integral SAURON, concluiu-se que há um σ_* – *drop* em torno de $2''$ próximo à região central da galáxia, ou seja, a dispersão de velocidades diminui $\approx 100 \text{ km s}^{-1}$ nessa região. Esse σ_* – *drop* pode estar associado ao resultado da acreção do gás central seguido pela formação estelar. Davies et al. (2007) confirmaram a presença de um σ_* – *drop* e verificaram um excesso de contínuo estelar dentro de $1''$ o qual estaria associado à presença de um disco nuclear que apresenta formação estelar recente, o que explicaria a diminuição da dispersão de velocidades. Martins et al. (2010) mostraram, através de síntese de população estelar, que em regiões a 100 pc ao sul do núcleo há traços de uma população estelar jovem. Além disso, verificaram a existência de uma contribuição do contínuo tipo lei de potência de 25% no núcleo. Eles também encontraram uma contribuição significativa de populações estelares com idades intermediárias especialmente em torno de 200 pc. Em Storchi-Bergmann et al. (2012) estudos de populações estelares em regiões internas a 180 pc mostram que houve dois recentes episódios de formação estelar, um deles há ≈ 30 milhões de anos próximo ao núcleo e o outro há 300 milhões de anos se estendendo por, praticamente, toda a região nuclear. Verificou-se que na região interna a 35 pc do núcleo há, predominantemente, estrelas mais velhas com idades maiores que 2 bilhões anos.

A massa do buraco negro central dessa galáxia é $\approx 8.0 \times 10^6 M_\odot$, estimada a partir de observações no microondas de emissões maser da molécula da água (Lodato; Bertin, 2003).

Müller-Sánchez et al. (2009) apresentaram um estudo da cinemática do hidrogênio molecular de NGC 1068, utilizando observações com a IFU do SINFONI e encontraram que o campo de velocidades é consistente com escoamentos de gás em direção ao centro de $15 M_\odot \text{ ano}^{-1}$. Müller-Sánchez et al. (2011) mapearam *outflows* em galáxias ativas utilizando espectroscopia IFU no infravermelho com o instrumento SINFONI instalado no VLT (*Very Large Telescope*) e com o instrumento OSIRIS instalado no Keck-I, ambos do ESO (*European Southern Observatory*), incluindo em sua amostra a galáxia NGC 1068, e encontram que as taxas de *outflows* são 2 – 3 ordens de magnitude maiores do que a taxa de acreção necessária para produzir a emissão do AGN. Outros trabalhos encontraram resultados semelhantes (Riffel; Storchi-Bergmann, 2011a; Riffel; Storchi-Bergmann; Winge, 2013).

2.2 NGC 2110

A galáxia NGC 2110 é uma espiral do tipo S0 com um AGN classificado como Seyfert do tipo 2 (NED¹), localizada a 30.2 Mpc e 1'' corresponde a 146 pc na galáxia. Estudos em diversos comprimentos de onda da galáxia revelam detalhes sobre sua morfologia estrutural, cinemática das estrelas e do gás.

Uma das questões mais estudadas é a origem da emissão estendida em raios-X detectada ao norte do núcleo entre 4 e 5 arcsec (Ferruit et al., 1999). Nesse mesmo trabalho, utilizando observações do HST, no UV e no óptico, cobrindo uma região espectral de 1090 – 6820 Å, foi proposto que a excitação e ionização do gás podem ser devidas a fonte central ou a choques.

No óptico, medidas da cinemática do gás mostram que o núcleo da galáxia está deslocado 1.7 arcsec em relação ao centro cinemático aparente (Wilson; Baldwin; Ulvestad, 1985; Storchi-Bergmann et al., 1999). Segundo esses autores, o descolamento do núcleo pode ser devido a efeitos de obscurecimento e a movimentos do gás ionizado, os quais não refletem o movimento orbital sujeito a um potencial gravitacional. Investigações sobre essa questão, revelaram que a rotação estelar ao longo de PA=174° é simétrica em torno do núcleo óptico e coincide com o centro cinemático.

Estudos na faixa do rádio e óptico revelam escoamentos de matéria em direção à região central e, também, oposta a ela (González Delgado et al., 2002; Rosario et al., 2010; Müller; Storchi-Bergmann; Nagar, 2012).

Uma estimativa da massa do buraco negro supermassivo de NGC 2110 foi realizada em Moran et al. (2007) e corresponde aproximadamente a 200 milhões de massas solares.

2.3 O instrumento NIFS

As observações espectroscópicas foram obtidas com o instrumento NIFS (*Near-infrared Integral Field Spectrograph*) que é uma unidade de campo integral (IFU – *Integral Field Unit*) na qual o transporte do sinal do detector até o espectrógrafo é feito refletindo imagens através de espelhos (*slices*), enquanto que, na maioria das IFUs esse transporte é realizado com fibras óticas. O NIFS foi construído pela RSAA (*Research School of Astronomy and Astrophysics*) da ANU (*Australian National University*) e montado no Telescópio Gemini Norte em Julho de 2005. Ele foi desenvolvido para obter dados espectroscópicos de alta qualidade e resolução espacial, fornecendo uma espectroscopia 3D, com duas dimensões espaciais (x e y) e uma espectral (λ), seu campo de visão é $\approx 3 \times 3$ arcsec², com elementos de resolução com tamanhos de $\sim 0.1 \times 0.04$ arcsec², sendo 0.1 arcsec a largura de

¹Nasa Extragalactic Database: <http://ned.ipac.caltech.edu/>

cada *slice* e 0.04 arcsec a medida ao longo das *slices*, próximo ao limite da difração do telescópio.

O projeto óptico dessa IFU é baseado no método AIS (*Advanced Image Slicer*) proposto por Content (1997), no qual a imagem original bidimensional é dividida em sub-imagens que são re-imageadas lado a lado como se fossem várias “fendas longas” na entrada do espectrógrafo. Na Figura 2.1 ilustramos esse método, onde os espelhos S1 dividem a imagem bidimensional (2D) em sub-imagens equivalentes ao que se teria através de uma fenda longa, as quais são refletidas nos espelhos S2 que as projetam em um conjunto de espelhos S3 localizados na superfície focal da entrada do espectrógrafo. Essas imagens são reorganizadas formando uma pseudo-fenda, assim tem-se a conversão de uma imagem 2D em uma “fenda-longa”.

O NIFS pode operar juntamente com o módulo de ótica adaptativa do telescópio Gemini Norte (ALTAIR). Seu espectrógrafo utiliza um detector Rockwell HAWAII-2 de 2048×2048 pixels com 2048 pixels espectrais por elemento espacial, o qual opera nas bandas espectrais Z, J, H e K, cobrindo um intervalo espectral de 0.94 a $2.50 \mu\text{m}$, no qual o sistema ALTAIR é mais eficiente. O poder de resolução (R) varia de $R=4990$ a 6040 dependendo da rede de dispersão utilizada, com R dado por $R = \lambda/\Delta\lambda$, onde $\Delta\lambda$ corresponde ao tamanho de 2 pixels espectrais e λ é o comprimento de onda central do filtro utilizado.

2.4 Observações

Os objetos foram observados com o instrumento NIFS, operando com o módulo de ótica adaptativa ALTAIR do Telescópio Gemini Norte. As observações da galáxia NGC 1068 foram realizadas em Dezembro de 2006 sob o programa GN-2006B-C-9, cobrindo a região espectral de $1.15 \mu\text{m}$ até $2.5 \mu\text{m}$, referente as bandas J ($1.15 \mu\text{m} - 1.36 \mu\text{m}$), H ($1.48 \mu\text{m} - 1.79 \mu\text{m}$) e K ($2.1 \mu\text{m} - 2.5 \mu\text{m}$). Foram realizadas 9 exposições de 90 s para a galáxia centradas em cada uma das seguintes posições (em arcsec): (-1,-1), (-1,0), (-1,1), (0,-1), (0,0), (0,1), (1,-1), (1,0) e (1,1), onde as posições são medidas ao longo das *slices* e perpendicular a elas em relação ao núcleo da galáxia, totalizando 810 s de exposição para cada posição. Dessa forma, o campo final é de $5'' \times 5''$, com um maior tempo de exposição no núcleo ($810 \text{ s} \times 9 = 7290 \text{ s}$, para os $1'' \times 1''$ centrais), diminuindo para as bordas. Neste trabalho utilizamos as bandas H e K, e o cubo da banda K foi obtido combinando os cubos das bandas K_s e K_ℓ .

A galáxia NGC 2110 foi observada na banda K. As observações foram realizadas em duas noites distintas, a primeira em Outubro de 2010 e a segunda em Novembro de 2010, sob o programa GN-2010B-Q-25. Na primeira noite (23/10/2010) foram realizadas 5 exposições individuais centradas no núcleo da galáxia com um tempo de 600 s cada, 3 observações individuais de céu com o mesmo tempo de exposição da galáxia e 3 observações da estrela padrão telúrica com um tempo de 18 s para

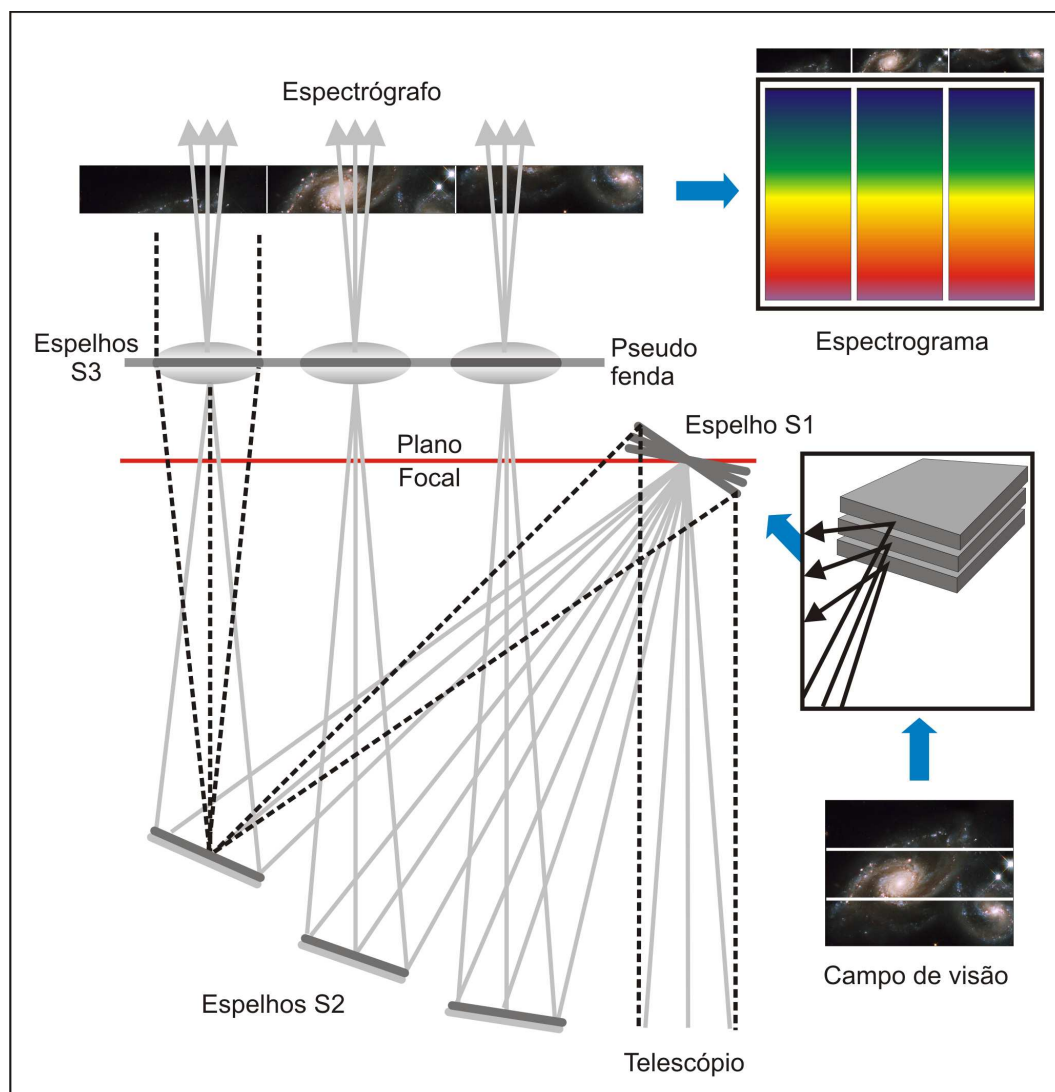


Figura 2.1: Ilustração do princípio do AIS equipado com três *slices*. Figura extraída de Allington-Smith et al. (2006) com algumas modificações.

cada exposição. Na segunda noite (24/11/2010) foi realizada apenas uma exposição de 600 s para a galáxia e para o céu, e 4 observações para a estrela padrão telúrica com tempo de exposição de 15 s cada. As exposições foram centradas em $\lambda = 2.3 \mu\text{m}$.

2.5 Redução de dados

As etapas de redução dos dados foram realizadas com o *software* IRAF (*Images Reduction And Analysis Facility*), que é composto de diversos pacotes e tarefas para redução e análise de dados astronômicos. Alguns dos passos para o processo de redução foram a divisão por *flat-field*, subtração do céu, calibração em comprimento de onda, correção por distorção espacial, remoção das bandas

telúricas, calibração em fluxo e a construção dos cubos de dados.

As observações constituem arquivos do tipo *flat-field*, corrente de escuro, lâmpada de calibração em comprimento de onda (ArXe), observações de céu, máscara *ronchi*, estrelas padrão e objetos de ciência², os quais serão descritos a seguir.

Os dados de NGC 1068 foram reduzidos pelo colaborador Peter McGregor, seguindo o mesmo procedimento adotado para NGC 2110 executado como parte do presente trabalho.

2.5.1 *Flat-field*

As respostas das fotocélulas de um detector CCD (*charge-coupled device*) para uma mesma quantidade de emissão recebida são levemente diferentes. Para corrigir essa diferença na sensibilidade pixel a pixel do CCD usam-se imagens *flat-field*. Determina-se a variação de sensibilidade do detector a partir de exposições de uma lâmpada que ilumina uniformemente o CCD, então, uma média é feita com a tarefa *gemcombine* e obtém-se um valor para as variações de sensibilidade pixel a pixel do CCD. No final, normaliza-se o *flat-field* médio com a tarefa *nsreduce*. Na Figura 2.2, mostramos uma imagem *flat-field* obtida com o NIFS. Podemos verificar as 29 *slices* que compõe a sua IFU.

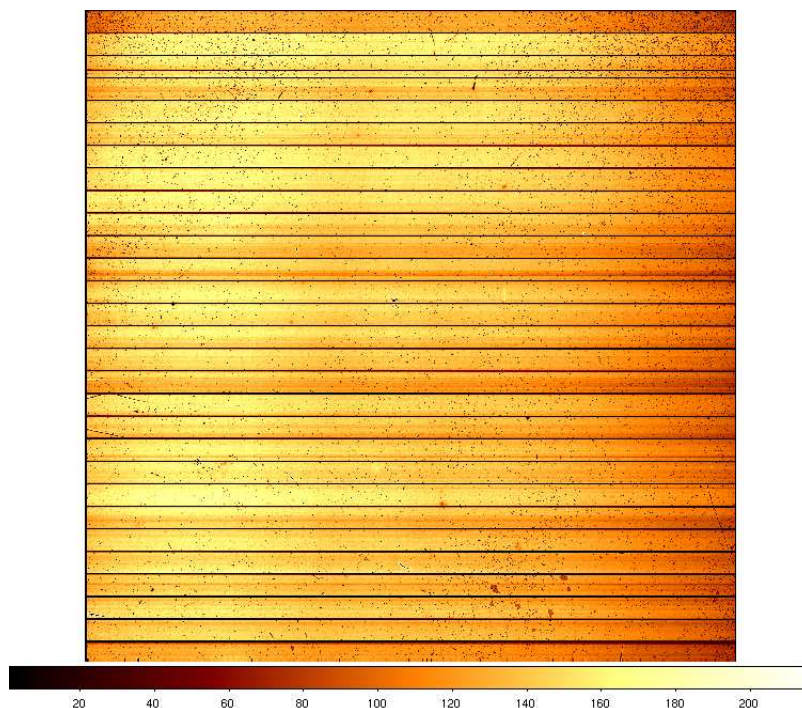


Figura 2.2: Imagem *flat-field* típica obtida com o NIFS.

²Objetos de ciência correspondem, neste caso, às galáxias NGC 1068 e NGC 2110.

2.5.2 Corrente de escuro

Mesmo quando o obturador está fechado a matriz do CCD registra um ruído térmico, denominado corrente de escuro. Para eliminar esse ruído são feitas imagens com o obturador fechado (ou *darks*) e com tempo de exposição igual ao tempo utilizado na aquisição da imagem bruta. Faz-se uma média com esse conjunto de *darks* que é subtraída das demais imagens de calibração obtidas.

2.5.3 Imagens *ronchi*

A imagem de máscara *ronchi* faz parte das calibrações padrão do NIFS e é utilizada para corrigir a distorção espacial. Ela é uma rede de dispersão de transmissão localizada no plano focal do instrumento, que é iluminada pela lâmpada de *flat-field*. Dessa maneira a máscara de *ronchi* produz uma distribuição uniforme de fontes compactas artificiais ao longo de cada *slice*. A máscara de *ronchi* produz nove traços espectrais para cada *slice* ao longo da direção espacial. Cada traço pode ser pensado como o traço de uma fonte puntual em uma dada posição espacial de cada *slice*. Ajustando-se os traços para todas as *slices* remove-se uma pequena inclinação sistemática do traço espectral (que é de ~ 1 pixel de ponta a ponta) e permite-se uma reconstrução precisa da imagem bidimensional.

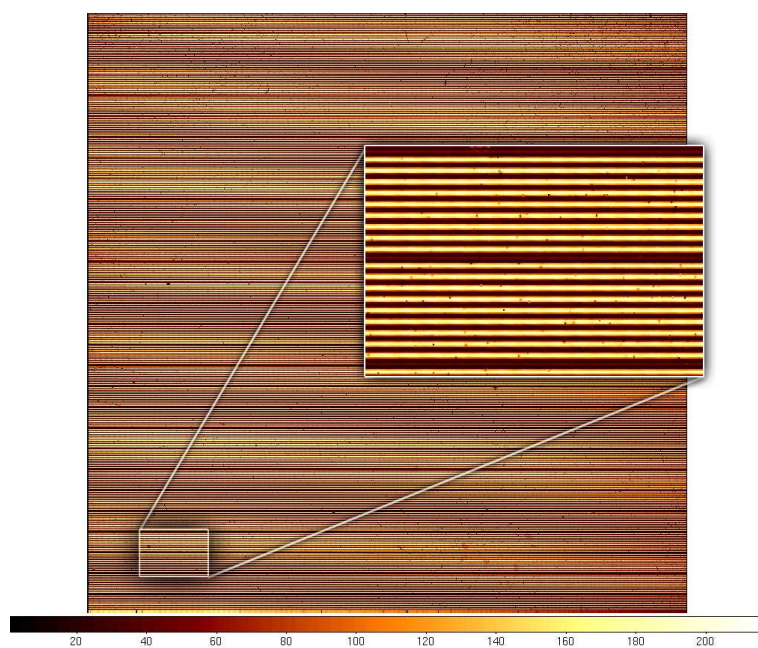


Figura 2.3: Imagem da máscara de *ronchi* com detalhe para duas *slices* mostrando os 9 traços espectrais de fontes pontuais para cada *slice*.

2.5.4 Lâmpada de ArXe

A calibração em comprimento de onda é obtida com espectros de lâmpadas de comparação. Na banda K utiliza-se uma lâmpada de ArXe. Utilizamos lâmpadas de calibração porque elas possuem um espectro de emissão com um conjunto de comprimentos de onda suficientemente espaçados e bem conhecidos. Dessa maneira, a radiação emitida pela lâmpada de comparação é formada por comprimentos de onda bem definidos. Seus espectros são tomados como tendo a relação precisa entre o comprimento de onda e o pixel e, por isso, utilizam-se essas lâmpadas como espectros de referência para a calibração em comprimento de onda dos objetos de interesse. Uma imagem típica da lâmpada de ArXe para a banda K é mostrada na Figura 2.4.

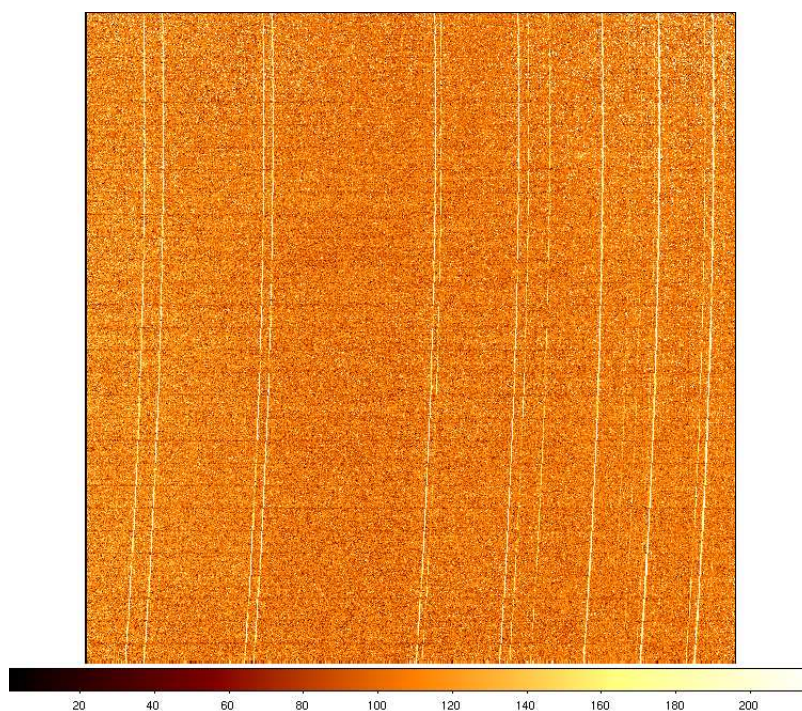


Figura 2.4: Imagem da lâmpada padrão – ArXe.

2.5.5 Estrelas padrão telúricas

Com o objetivo de eliminar absorções telúricas da atmosfera, obtém-se observações de estrelas padrão telúricas, as quais apresentam, em seus espectros na banda K, somente a linha de absorção Br γ , que é eliminada artificialmente durante o processo de redução de dados. Os espectros resultantes são usados para eliminar absorções telúricas da atmosfera, dividindo o espectro de ciência por um espectro normalizado da estrela padrão telúrica.

2.5.6 Calibração em fluxo

No infravermelho utilizamos o espectro da estrela telúrica para obtermos a calibração em fluxo. Através da base de dados SIMBAD³ obtivemos o valor da magnitude e o tipo espectral da estrela, ou seja, sua temperatura. Com esses valores fixos ajustamos uma função tipo corpo negro ao espectro estelar em uma determinada banda. Essa função tipo corpo negro é utilizada como referência para converter as contagens detectadas pelo CCD para unidades de fluxo em $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1}$.

2.5.7 O Cubo de dados

Os cubos individuais para cada exposição foram criados com a tarefa *nifcube* e combinados com a tarefa *gemcombine*, levando em conta possíveis diferenças da posição do núcleo em cada um dos cubos criados. O cubo final de NGC 2110 contém 61×64 pixels espaciais quadrados com tamanhos de $0.05''$ e 2040 pixels espectrais.

A redução dos dados da galáxia NGC 1068 foi realizada pelo colaborador Peter J. McGregor do Centro de Pesquisas em Astronomia e Astrofísica da Universidade Nacional da Austrália. Utilizamos um cubo na banda H e outro na banda K para medir a cinemática estelar. Ambos possuem pixels retangulares com tamanhos $dx = 0.103''$ e $dy = 0.089''$ nos eixos x e y , respectivamente. Nas coordenadas espaciais temos $x = 44$ px e $y = 54$ px. Utilizamos o *software* QFITSView para transformar os pixels retangulares em pixels quadrados. Os cubos finais contém 44×47 pixels espaciais com tamanhos $dx \approx dy \approx 0.103''$, cobrindo uma região de $\approx 5'' \times 5''$. Os cubos das bandas H e K possuem, respectivamente, 2040 e 2534 pixels espectrais.

2.5.7.1 Resolução espectral

Quanto mais próximos estiverem dois comprimentos de onda maior deve ser a resolução espectral do espectrógrafo para que seja possível resolvê-los, ou seja, só é possível diferenciar duas linhas espectrais próximas se elas estiverem mais afastadas do que a resolução espectral do instrumento.

Realizamos ajustes de curvas gaussianas em perfis típicos de linhas de emissão da lâmpada de ArXe utilizada para calibrar os espectros, a fim de se obter uma medida da FWHM desses perfis, que corresponde a medida da resolução espectral. Essas medidas foram realizadas com a tarefa *splot* do *software* IRAF clicando com a letra “k” em pontos de contínuo de ambos os lados do perfil a ser ajustado.

Para NGC 2110 obtivemos uma resolução espectral de $\text{FWHM} \approx 3.4 \text{Å}$, que corresponde a

³SIMBAD é um banco de dados astronômico (<http://simbad.u-strasbg.fr/>) que fornece informações básicas de objetos astronômicos localizados fora do sistema solar.

$\approx 46 \text{ km s}^{-1}$. Repetimos o procedimento para a medida da resolução espectral na NGC 1068 e encontramos um valor de $\approx 3.6\text{\AA}$ na banda K e $\approx 3.0\text{\AA}$ na banda H, correspondendo, respectivamente, a $\approx 49 \text{ km s}^{-1}$ e $\approx 55 \text{ km s}^{-1}$.

2.5.7.2 Resolução espacial

Quanto mais detalhes são observados numa imagem maior é a resolução espacial do espectrógrafo, isso significa que quanto mais pixels o CCD possuir por unidade de tamanho angular, melhor é a qualidade da imagem. Semelhantemente a resolução espectral, pode-se dizer que duas fontes pontuais somente são resolvidas se estiverem mais distantes uma da outra do que a resolução espacial.

Obtivemos essa medida da seguinte maneira: (1) com a tarefa a *blkavg*, construímos uma imagem da emissão contínua da estrela padrão telúrica, em seguida, (2) executamos a tarefa *imexamine* na imagem do contínuo. Essa tarefa retorna, como um dos seus parâmetros, o valor da distribuição de fluxo da estrela (FWHM).

Para NGC 2110 obtivemos uma resolução angular (FWHM) de $\approx 0.15''$ que equivale a $\approx 24 \text{ pc}$ e para NGC 1068 a resolução é de $\approx 8 \text{ pc}$ (Storchi-Bergmann et al., 2012).

2.6 Procedimento de redução de dados

Durante a redução de dados realizamos as seguintes etapas para obtermos o cubo de dados final de NGC 2110 na banda K:

1. Divisão por *flat-field* normalizado;
2. Subtração do céu;
3. Remoção de raios cósmicos;
4. Calibração em comprimento de onda e correção por distorção espacial;
5. Remoção de absorções telúricas;
6. Calibração em fluxo;
7. Construção do cubo de dados;
8. Combinar os cubos de dados individuais em um único cubo.

A seguir descrevemos as principais tarefas do pacote *gemini.nifs* utilizadas para a redução dos dados de calibrações (*flat-field* e lâmpada de calibração em comprimento de onda – ArXe):

1. *nfprepare*: adiciona informações no cabeçalho (*header*) contendo as coordenadas espaciais das *slices*. Na prática tem-se uma fenda longa e esta tarefa reorganiza as posições das *slices*.
2. *nsreduce*: separa os sinais de cada *slice* em uma extensão diferente dentro do arquivo MEF (Multi Extension Fits) que corresponde a várias imagens dentro do mesmo arquivo. As extensões são [sci,1] para a *slice 1*, [sci,2] para a *slice 2* ... [sci,29] para a *slice 29*.
3. *nsflat*: essa tarefa faz uma média dos arquivos individuais para os *flats* utilizando o algoritmo de rejeição *ccdclipping*. O arquivo de saída dessa tarefa é uma imagem normalizada para o *flat-field*.
4. *nswavelength*: usou-se essa tarefa para obter a solução em comprimento de onda dos arquivos de lâmpada.

Para os dados de ciência e estrelas telúricas, procedemos da seguinte maneira:

1. *nfprepare*: o mesmo que para os *flats* e os *arcs*.
2. *nsreduce*: o procedimento é análogo ao anterior, mas agora aplicamos a correção do *flat-field* para a estrela e galáxia. Nessa etapa também foi realizada a subtração do céu.
3. *nstransform*: essa tarefa aplica a calibração em comprimento de onda utilizando a solução obtida pelo *nswavelength* e aplica a calibração de distorção espacial usando a máscara de *ronchi*.
4. *nftelluric*: executa a remoção das bandas telúricas presentes nos espectros das galáxias utilizando como referência o espectro da estrela padrão. Tarefa aplicada apenas para os dados de ciência.
5. *nfextract*: os espectros das estrelas foram extraídos para todas as exposições individuais utilizando essa tarefa para uma abertura de 1.2 arcsec de diâmetro que é muito maior que o *seeing* típico.
6. *gemcombine*: utilizou-se essa tarefa para combinar os espectros individuais de cada estrela através de uma média. Essa etapa e também a etapa 5 foram aplicadas somente para as observações de estrelas padrão telúricas.
7. *calibrate*: essa tarefa aplica a calibração em fluxo por comprimento de onda dos espectros através da curva de sensibilidade, que é obtida com a tarefa *sensfunc* a partir do ajuste de um corpo negro ao contínuo da estrela telúrica.

8. *nifcube*: responsável pela construção final do cubo de dados.
9. *gemcombine*: com essa tarefa combinamos todos os cubos individuais em um único arquivo levando em conta desvios da posição do núcleo de um frame para outro. Os arquivos foram combinados fazendo-se uma medida e aplicando-se o algoritmo *sigclip* para rejeitar pontos ruins, ainda não excluídos pelo processo de redução de dados.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo apresentamos os procedimentos utilizados para a obtenção de medidas associadas às propriedades físicas das duas galáxias em estudo.

3.1 Cinemática estelar

Utilizamos o método pPXF (Penalized Pixel-Fitting) de Cappellari e Emsellem (2004) para realizar medidas da cinemática estelar na região central das galáxias NGC 1068 e NGC 2110 a partir de ajustes nas bandas de absorção estelar do CO presentes nos espectros das galáxias. Para NGC 1068 utilizamos tanto absorções presentes na banda H ($\approx 1.62\mu\text{m}$) quanto na banda K ($\approx 2.3\mu\text{m}$) enquanto que, para a galáxia NGC 2110 a cinemática estelar foi obtida a partir de ajustes de absorções do CO presentes na banda K. Esse método utiliza uma base de espectros de diferentes estrelas que sejam representativas das estrelas que produzem o espectro de absorção da galáxia. Para a banda K utilizamos a biblioteca de espectros de estrelas de tipo tardio de Winge, Riffel e Storchi-Bergmann (2009), atualizada por Diniz (2010) com 60 estrelas observadas com os instrumentos GNIRS e NIFS dos telescópios GEMINI. Para a banda H utilizamos espectros de 5 estrelas de tipo tardio obtidas com o NIFS, as quais são de domínio público na base de dados do Observatório Gemini e foram reduzidas como parte deste trabalho. Os espectros dessas estrelas são mostrados na Figura 1.5.

O pPXF realiza uma correlação cruzada entre os espectros da biblioteca e o espectro da galáxia. Desse método resultam medidas da velocidade estelar (V_*), dispersão de velocidades (σ_*), e momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 .

A distribuição de velocidades ao longo da linha de visada (LSVD) é escrita em termos das séries de Gauss-Hermite:

$$L(v) = \frac{e^{-(1/2)y^2}}{\sqrt{2\pi}} \left[1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right], \quad (3.1)$$

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

Os parâmetros h_3 e h_4 são responsáveis, respectivamente, por desvios assimétricos (como por exemplo, perfis que apresentem asas) e simétricos (como por exemplo, perfis achatados, em relação a uma gaussiana). Ao realizar o ajuste, a série da Eq. 3.1 é truncada em $m=4$, retornando valores para os parâmetros V , σ , h_3 e h_4 .

3.2 Ajustes dos perfis das linhas de emissão

A partir de ajustes das linhas de emissão $H_2 \lambda 2.12183 \mu\text{m}$ e $HI \lambda 2.16612 \mu\text{m}$ ($\text{Br } \gamma$) construímos mapas bidimensionais para fluxos, velocidades, σ , h_3 e h_4 para o gás emissor dessas linhas na região central da galáxia NGC 2110. Utilizamos a rotina PROFIT (*Emission Line PROFILE FITting routine*, Riffel (2010)), a qual nos permite, fazer ajustes de curvas Gaussianas ou séries de Gauss-Hermite aos perfis das linha de emissão.

No ajuste de uma determinada linha de emissão, a rotina PROFIT requer como parâmetros de entrada: [1] o cubo de dados que se deseja ajustar os perfis, [2] o valor do comprimento de onda central (λ_0) da linha de emissão, obtido em laboratório, [3] um chute inicial para o comprimento de onda da linha de emissão a ser ajustada que, geralmente, está deslocada em relação ao (λ_0), [4] um chute inicial para σ , em \AA correspondente à região na qual está situada a linha de emissão, [5] o método escolhido para o ajuste Gaussiano ou Gauss-Hermite. O arquivo de saída dessa rotina possui 7 extensões contendo: [1] fluxo a partir do ajuste, [2] velocidade, obtida a partir do comprimento de onda central, [3] dispersão de velocidades, [4] momento de Gauss-Hermite h_3 , [5] momento de Gauss-Hermite h_4 , [6] fluxo obtido através da integração direta do perfil da linha e [7] o χ^2 dos ajustes.

Caso a opção seja por ajustes de séries de Gauss-Hermite, a rotina faz a seguinte aproximação para o perfil de uma determinada linha de emissão (van der Marel; Franx, 1993; Gerhard, 1993; Cappellari; Emsellem, 2004; Riffel, 2010):

$$GH = \frac{A\alpha(\omega)}{\sigma} \sum_{j=0}^n h_j H_j(\omega), \quad (3.2)$$

onde

$$\omega = \frac{\lambda - \lambda_c}{\sigma} \quad (3.3)$$

e

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\omega^2/2}, \quad (3.4)$$

onde A é a amplitude das séries de Gauss-Hermite, λ_c é o comprimento de onda central, h_j são os momentos de Gauss-Hermite e $H_j(\omega)$ são os polinômios de Hermite. Quando o perfil da linha de emissão é similar a uma gaussiana podemos truncar a soma em $n=4$ e assumir $h_0 = H_0(\omega) = 1$, $h_1=h_2 = 0$ (van der Marel; Franx, 1993). Esta é uma boa aproximação se a linha de emissão apresentar perfis com asas (assimétricos) ou achatados (simétricos), os quais, geralmente, são observados em NLR de galáxias ativas (Komossa, 2008; Riffel et al., 2009; Riffel, 2010). Com a aproximação acima, a Eq. 3.2, pode ser escrita como:

$$GH = \frac{A\alpha(\omega)}{\sigma} [1 + h_3 H_3(\omega) + h_4 H_4(\omega)], \quad (3.5)$$

onde

$$H_3(\omega) = \frac{1}{\sqrt{6}} (2\sqrt{2}\omega^3 - 3\sqrt{2}\omega) \quad (3.6)$$

e

$$H_4(\omega) = \frac{1}{\sqrt{24}} (4\omega^4 - 23\omega^2 + 3). \quad (3.7)$$

Na Figura 3.1 apresentamos exemplos de ajustes de perfis a partir de gaussianas (coluna da esquerda) e por séries de Gauss-Hermite (coluna da direita) para a linha do $H_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ da galáxia NGC 2110 para espectros obtidos com aberturas de $0.05'' \times 0.05''$ em diferentes posições da galáxia. O espectro, nos painéis superiores, foi extraído a $\approx 1''$ na direção nordeste do núcleo e o espectro dos painéis inferiores foi extraído a $\approx 0.5''$ na direção sudeste. As séries de Gauss-Hermite ajustam-se melhor aos perfis da linha de emissão e foram adotadas neste trabalho, embora se observe um duplo pico nos perfis a $\approx 1''$ do núcleo. As duas componentes são vistas somente em algumas regiões do campo observado.

Para cada pixel espacial obtém-se uma medida para os parâmetros V , σ , h_3 e h_4 . A partir desses parâmetros foram construídos mapas bidimensionais. A velocidade é dada por

$$V = c \frac{\lambda^2 - \lambda_o^2}{\lambda^2 + \lambda_o^2}, \quad (3.8)$$

onde λ_o corresponde ao comprimento de onda central da linha de emissão medido em laboratório, λ representa o comprimento de onda observado para a mesma linha no espectro da galáxia e c é o módulo da velocidade da luz.

O mapa bidimensional para o fluxo de uma determinada linha é obtido pela integral da Eq. 3.5 em todos os pixels espaciais e os demais mapas resultam diretamente dos parâmetros (σ , h_3 e h_4) obtidos do ajuste para todos os pixels espaciais.

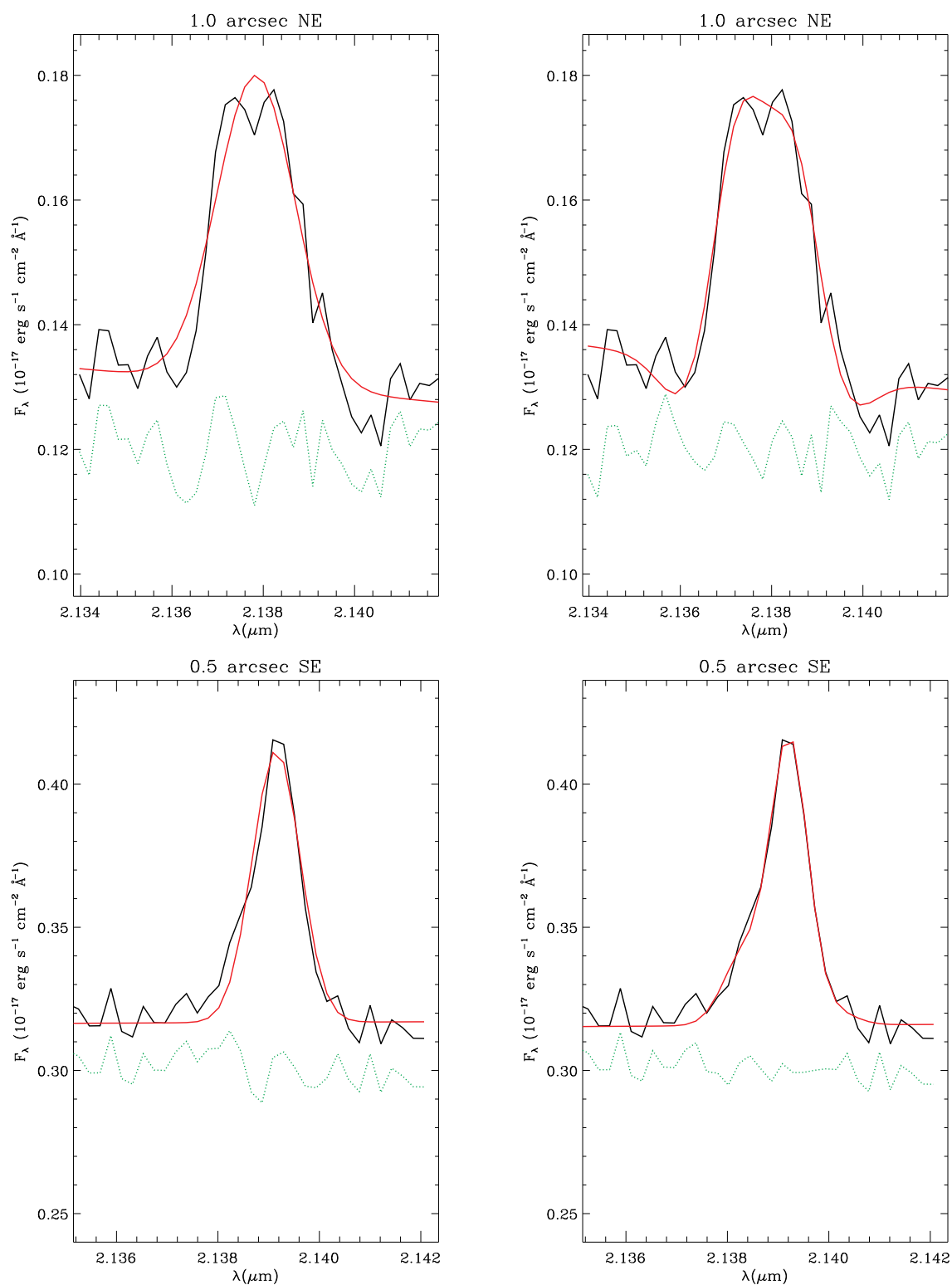


Figura 3.1: Na coluna da esquerda, ajustes a partir de gaussianas e na coluna da direita, ajustes através das séries de Gauss-Hermite para a linha H_2 $\lambda 2.1218 \mu\text{m}$ em diferentes posições da galáxia NGC 2110.

3.3 Mapas de fluxo em diferentes velocidades – *Channel maps*

Os *channel maps* servem para mapear distribuições de fluxo em diferentes velocidades, isso significa que eles nos mostram a localização e estrutura do gás que está emitindo em cada velocidade. Para a construção desses mapas integramos o perfil da linha de 2 em 2 pixels e subtraímos um valor médio do contínuo obtido em regiões adjacentes ao perfil, assim obtemos o valor do fluxo da linha para *bins* de 2 pixels. Os valores para a velocidade, na qual cada mapa de fluxo está centrado resulta da seguinte equação:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}c - V_s, \quad (3.9)$$

onde v é a velocidade, λ_0 é o valor do comprimento de onda da linha medido em laboratório, $\Delta\lambda$ é a diferença entre o comprimento de onda observado e λ_0 , c é o valor da velocidade da luz e V_s é a velocidade sistêmica da galáxia. Dessa forma, obtivemos mapas bidimensionais para o fluxo em diferentes velocidades em relação à velocidade sistêmica da galáxia para uma linha de emissão específica.

3.4 Modelo cinemático

Aplicamos um modelo de rotação aos mapas de velocidades estelar a fim de se obter alguns parâmetros físicos como a velocidade sistêmica, orientação da linha dos nodos, massa do bojo e a posição do centro cinemático. Assumimos órbitas circulares em um plano e um potencial gravitacional de Plummer para as estrelas, onde a velocidade radial é dada por (Barbosa et al., 2006):

$$V_r(R, \Psi) = V_s + \sqrt{\frac{R^2 GM}{(R^2 + A^2)^{3/2}}} \frac{\sin(i)\cos(\Psi - \Psi_0)}{\left(\cos^2(\Psi - \Psi_0) + \frac{\sin^2(\Psi - \Psi_0)}{\cos^2(i)}\right)^{3/4}}, \quad (3.10)$$

onde R é a distância ao núcleo da galáxia, projetada no plano do céu, Ψ é o ângulo de posição, M é a massa do esferóide, G é a constante de gravitação universal de Newton, V_s é a velocidade sistêmica da galáxia, i é a inclinação do disco da galáxia ($i = 0$ para um disco *face on*), Ψ_0 é o ângulo de posição da linha dos nodos e A é um fator de escala projetado no plano do céu. A equação acima resulta em um mapa de velocidades para o modelo a partir do ajuste de cinco parâmetros livres (M, V_s, A, Ψ_0, i). O ajuste da equação acima aos campos de velocidades das estrelas foi realizado a partir de uma rotina escrita em IDL (*Interface Description Language*) que utiliza a rotina MPFIT2DFUN¹ para aplicar o método de mínimos quadrados não linear.

¹<http://www.physics.wisc.edu/~craigm/idl/fitqa.html>

Capítulo 4

Resultados: NGC 1068

Neste capítulo apresentamos os resultados da cinemática estelar a partir de ajustes das absorções do CO, nas bandas H e K, centradas em, respectivamente, 1.5 e $2.3\mu\text{m}$, presentes nos espectros da galáxia. Esses resultados são parte do trabalho publicado em Storchi-Bergmann et al. (2012), que

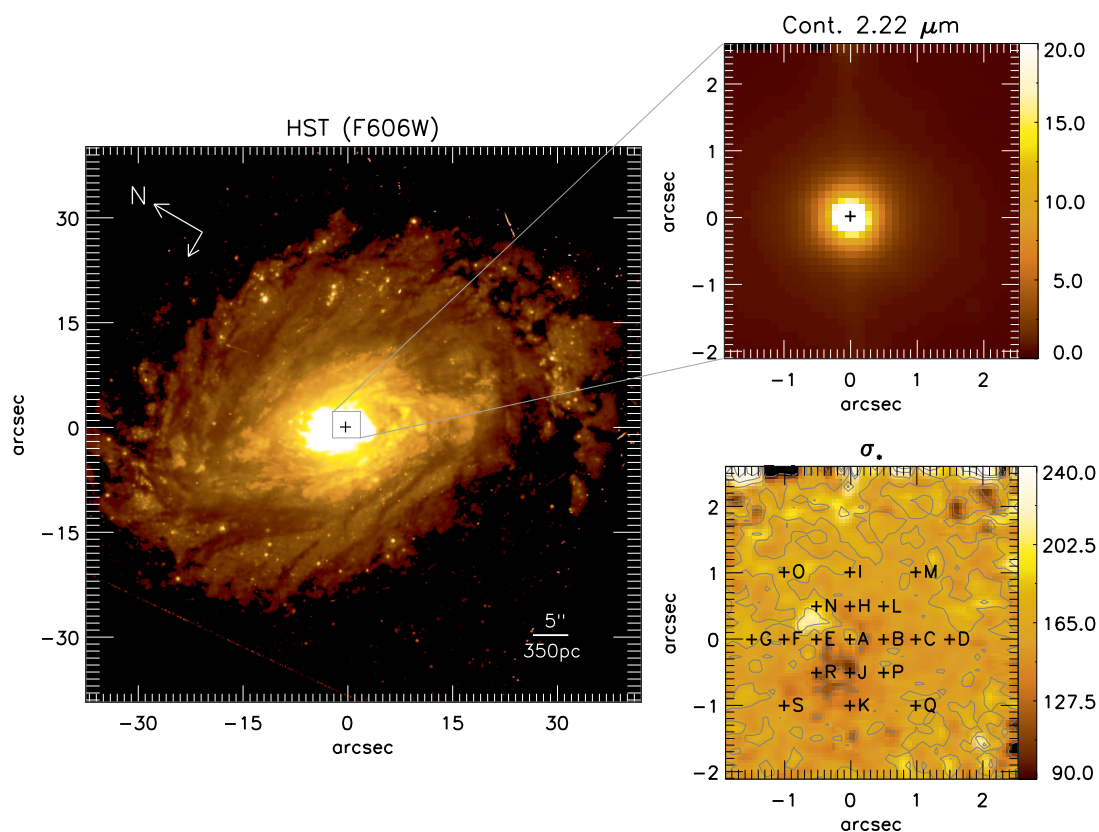


Figura 4.1: No painel à esquerda, uma imagem em grande escala da galáxia NGC 1068 no óptico obtida com o HST. No painel superior direito, uma imagem do contínuo a partir de dados observados com o NIFS, em unidades de $10^{-17}\text{ erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$, e no painel inferior direito, o mapa de dispersão de velocidades, em unidades de km s^{-1} com as posições onde foram extraídos espectros do cubo da galáxia.

além de apresentar a cinemática estelar, também apresenta resultados da síntese de populações estelares para NGC 1068. A análise da emissão e cinemática do gás está sendo realizada independentemente e não faz parte deste trabalho.

No painel esquerdo da Figura 4.1 mostramos uma imagem em grande escala da galáxia NGC 1068 obtida no óptico com o Telescópio Espacial Hubble, para um campo de $\approx 70 \times 50 \text{ arcsec}^2$, equivalente a $4900 \times 3500 \text{ pc}^2$. Aplicamos uma rotação à imagem de modo que ela tivesse a mesma orientação das observações obtidas com o NIFS. O retângulo central mostra a região observada com a IFU do NIFS cobrindo uma área de $\approx 5 \times 5 \text{ arcsec}^2$, correspondente a $\approx 350 \times 350 \text{ pc}^2$. No painel superior da direita apresentamos uma imagem do contínuo na banda K, obtida com o NIFS. O símbolo “+” determina a posição do núcleo definido como o pico da emissão contínua. Na imagem inferior direita apresentamos o mapa de dispersão de velocidades estelar e as posições onde extraímos espectros da galáxia para as bandas H e K, mostrados nas Figuras 4.2 e 4.3.

Na Figura 4.2 exibimos os 19 espectros extraídos do cubo da galáxia na banda H para uma abertura de $0.1'' \times 0.1''$, cujas posições estão identificadas no mapa da dispersão de velocidades na Figura 4.1, onde a posição (A) corresponde ao núcleo da galáxia.

Na Figura 4.3, mostramos os 19 espectros extraídos do cubo da galáxia na banda K para a mesma abertura, cujas posições estão identificadas no mapa da dispersão de velocidades na Figura 4.1. O primeiro espectro corresponde ao núcleo da galáxia. Identificamos a linha de emissão do [Ca VIII] $\lambda 2.3222 \mu\text{m}$, nos espectros correspondentes às posições A, E, F e G. Todos os espectros apresentam bandas de absorção do CO e com exceção dos espectros das posições A e B todos os demais apresentam intensas linhas de emissão referentes ao hidrogênio molecular H_2 . O espectro nuclear mostra que bandas do CO têm intensidades menores (em relação ao contínuo) quando comparadas a espectros de outras posições. Isso se deve, provavelmente a diluição dessa banda pela emissão da poeira e do AGN.

4.1 Cinemática estelar

Como mencionado na seção 3.1, a cinemática estelar foi obtida pelo método pPXF a partir de ajustes nas absorções estelares do CO nas bandas H e K dos cubos de dados da galáxia. Na banda K os espectros da galáxia NGC 1068 estão contaminados em algumas regiões pela intensa emissão da linha coronal do [Ca VIII] $\lambda 2.322 \mu\text{m}$ e pela emissão de poeira e do AGN. Portanto, foi necessário combinar o ajuste das duas bandas para obtermos mapas cinemáticos com medidas mais precisas.

Nos painéis das Figuras 4.4, 4.5 e 4.7 mostramos mapas bidimensionais para o campo de velocidades radiais (V_*), dispersão de velocidades (σ_*) e momentos de Gauss-Hermite h_{3*} e h_{4*} . O

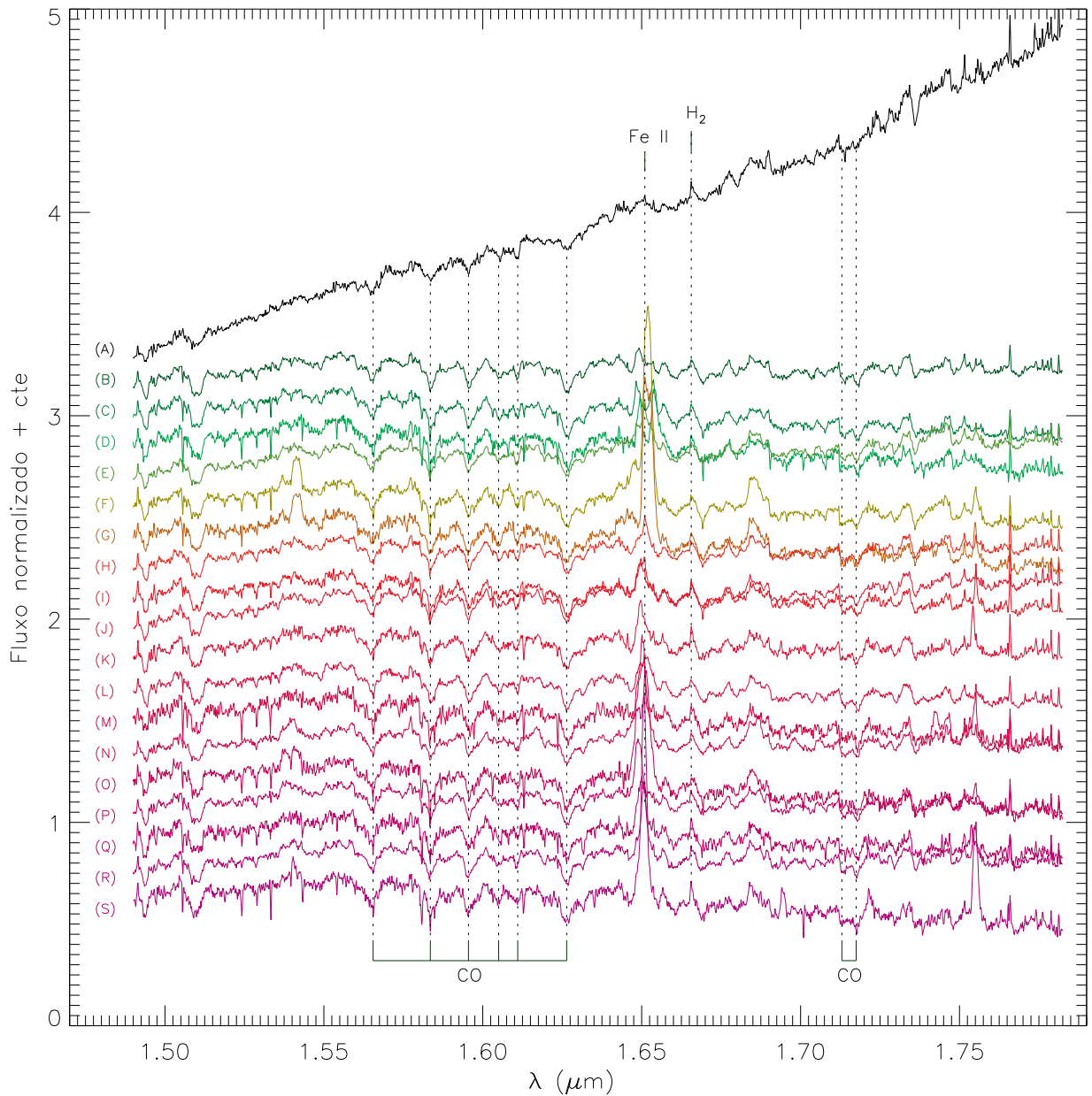


Figura 4.2: Espectros da galáxia NGC 1068 obtidos na banda H, com uma abertura de $0.1'' \times 0.1''$ para as posições indicadas no mapa de dispersão de velocidades da Figura 4.1. O espectro (A) corresponde ao núcleo da galáxia. Identificamos algumas bandas de absorção do CO e linhas de emissão do H₂ e [Fe II].

símbolo “+” identifica a posição do núcleo e o eixo maior está orientado a $PA=80^\circ$.

Na Figura 4.4, tem-se os resultados para velocidade e σ_* obtidos a partir de ajustes na banda K. No painel superior esquerdo mostramos o campo de velocidades estelar, o qual apresenta um padrão de rotação típico, indicando que a região inferior, na direção sudeste, está se aproximando, enquanto que, a região superior, na direção noroeste, está se afastando de nós. Neste mapa subtraímos o valor da velocidade sistêmica da galáxia (1145.6 km s^{-1}), o qual obtivemos a partir da aplicação do

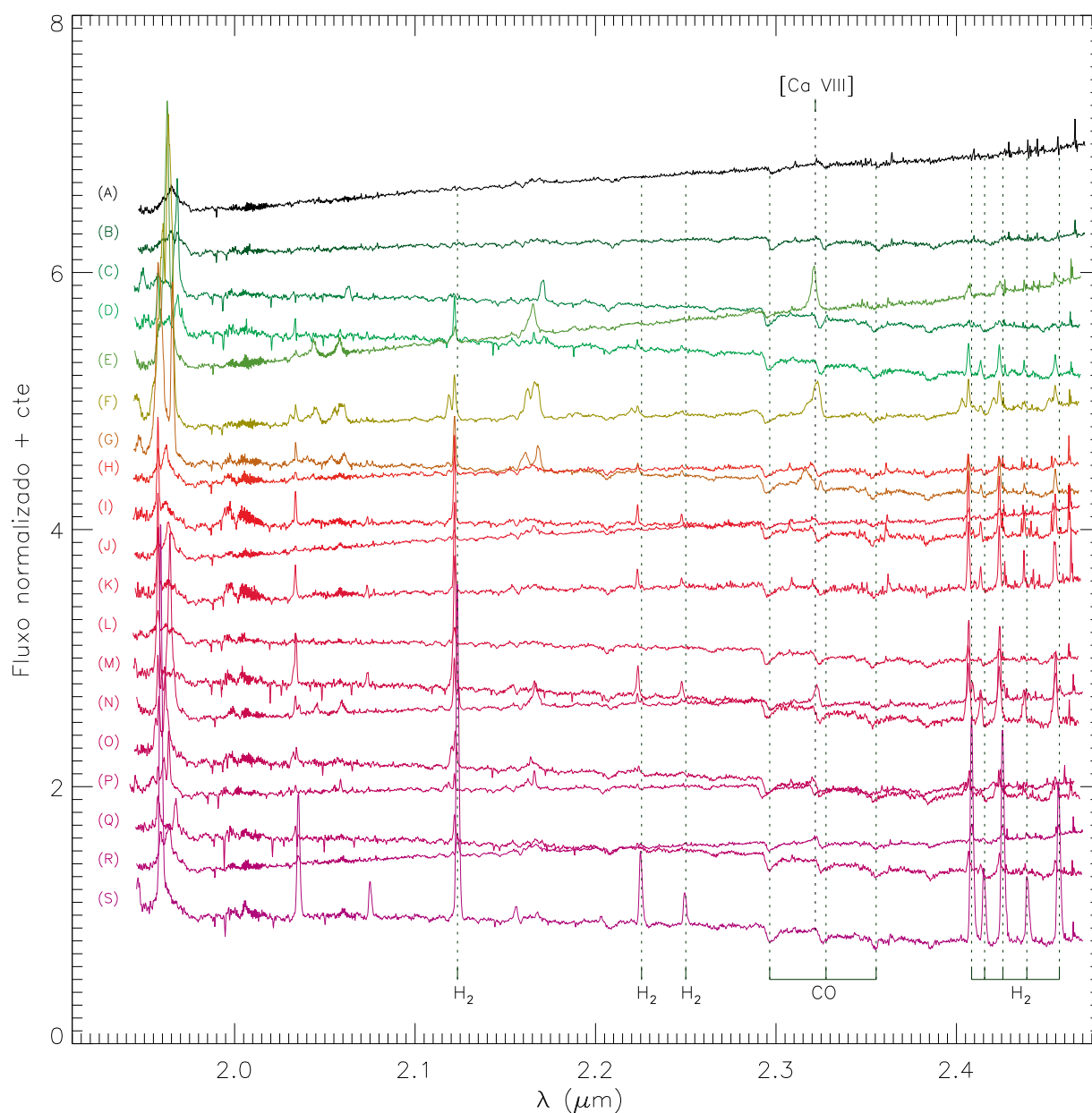


Figura 4.3: Espectros na banda K da galáxia NGC 1068, obtidos para uma abertura de $0.1'' \times 0.1''$ para as posições indicadas no mapa de dispersão de velocidades da Figura 4.1.

modelo de rotação discutido na seção 3.4. O círculo representa a região na qual há intensa emissão da linha do [Ca VIII] e poeira, medidas nessa região não são precisas. O mapa de erro apresentado no painel direito superior mostra incertezas maiores que 30 km s^{-1} na região próxima ao núcleo e valores menores nas demais regiões.

O painel inferior esquerdo mostra o mapa da dispersão de velocidades estelar com valores entre 90 e 240 km s^{-1} , ele também apresenta uma região escura ao sudeste do núcleo até $\approx 1''$, que corresponde aos pontos onde o pPXF não forneceu ajustes precisos nas bandas de absorção do CO. Na região ao

sudeste, próxima ao núcleo, observamos uma diminuição nos valores da dispersão de velocidades estelar. As incertezas associadas à medidas de σ_* são mostradas no painel inferior direito, o qual apresenta erros menores que 10 km s^{-1} para a maioria dos pontos.

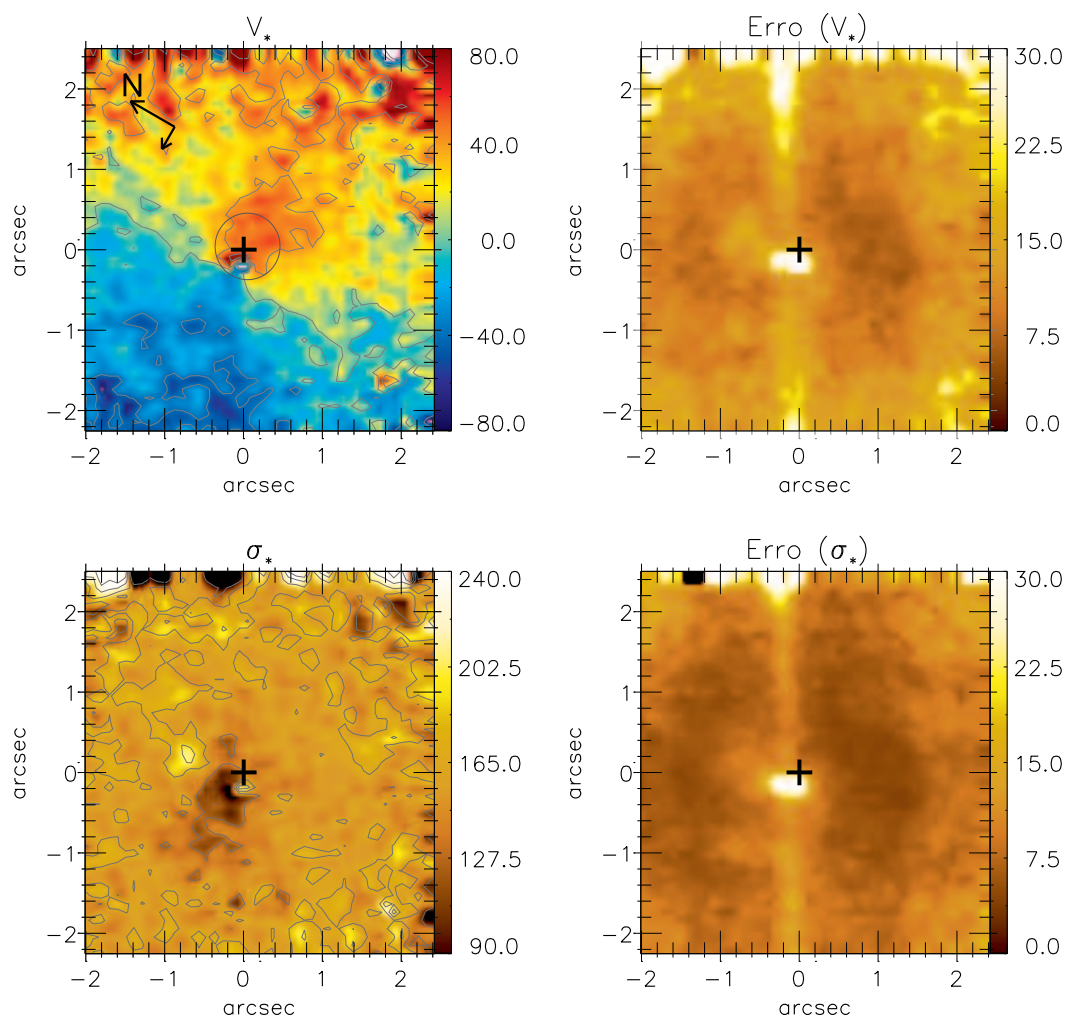


Figura 4.4: Cinemática estelar da galáxia NGC 1068, obtida na banda K. Nos painéis superiores são mostrados o campo de velocidades radiais à esquerda e seus respectivos erros à direita. Nos painéis inferiores são mostrados o mapa de σ_* à esquerda e medidas de suas incertezas à direita. Em todos os painéis as barras de cores estão em unidades de km s^{-1} .

Na Figura 4.5, apresentamos mapas cinemáticos estelares para a banda H. No painel superior esquerdo temos o campo de velocidades radiais apresentando um padrão de rotação típico, onde subtraímos a velocidade sistêmica da galáxia. Esse mapa concorda com o obtido para a banda K, porém é mais “ruidoso” devido ao fato da absorção do CO na banda H ser intrinsicamente menor do que as absorções da banda K.

No painel inferior esquerdo observamos que o mapa da dispersão de velocidades estelar apresenta os maiores valores em torno de $\approx 190 \text{ km s}^{-1}$, mas na região central, a $\approx 0.3''$ do núcleo e na direção

do eixo maior da galáxia esses valores diminuem para $\approx 125 \text{ km s}^{-1}$, concordando com os resultados obtidos para a banda K.

Os painéis à direita representam medidas de incertezas para velocidade (painel superior) com a maioria dos pontos apresentando erros menores que 15 km s^{-1} , exceto na região sudeste ao núcleo, onde as incertezas são maiores que 30 km s^{-1} e σ_* (painel inferior) que apresenta valores menores que 10 km s^{-1} .

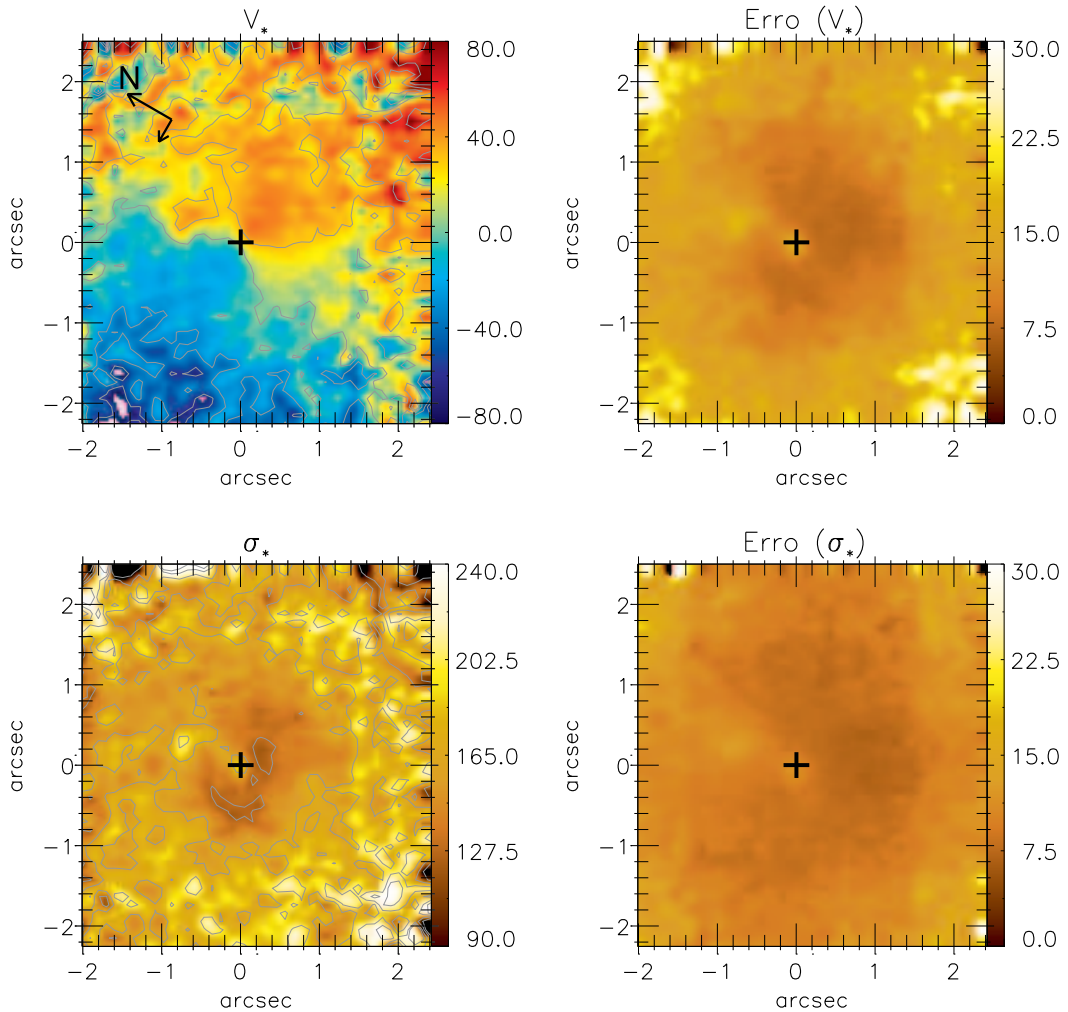


Figura 4.5: Mapas da cinemática estelar na banda H para NGC 1068. No painel superior esquerdo é mostrado o campo de velocidades radiais e no painel inferior esquerdo é mostrado o mapa da dispersão de velocidades estelar. Incertezas nas medidas são apresentadas nos painéis da direita. A escala de cor está em unidades de km s^{-1} em todos os painéis.

Na Figura 4.6 apresentamos os ajustes (em vermelho) obtidos com o pPXF em comparação com os espectros observados (em preto) da galáxia, as posições de extração de cada espectro são mostradas no topo de cada painel. Ajustes na banda H são mostrados nos painéis superiores e ajustes na banda K nos painéis inferiores.

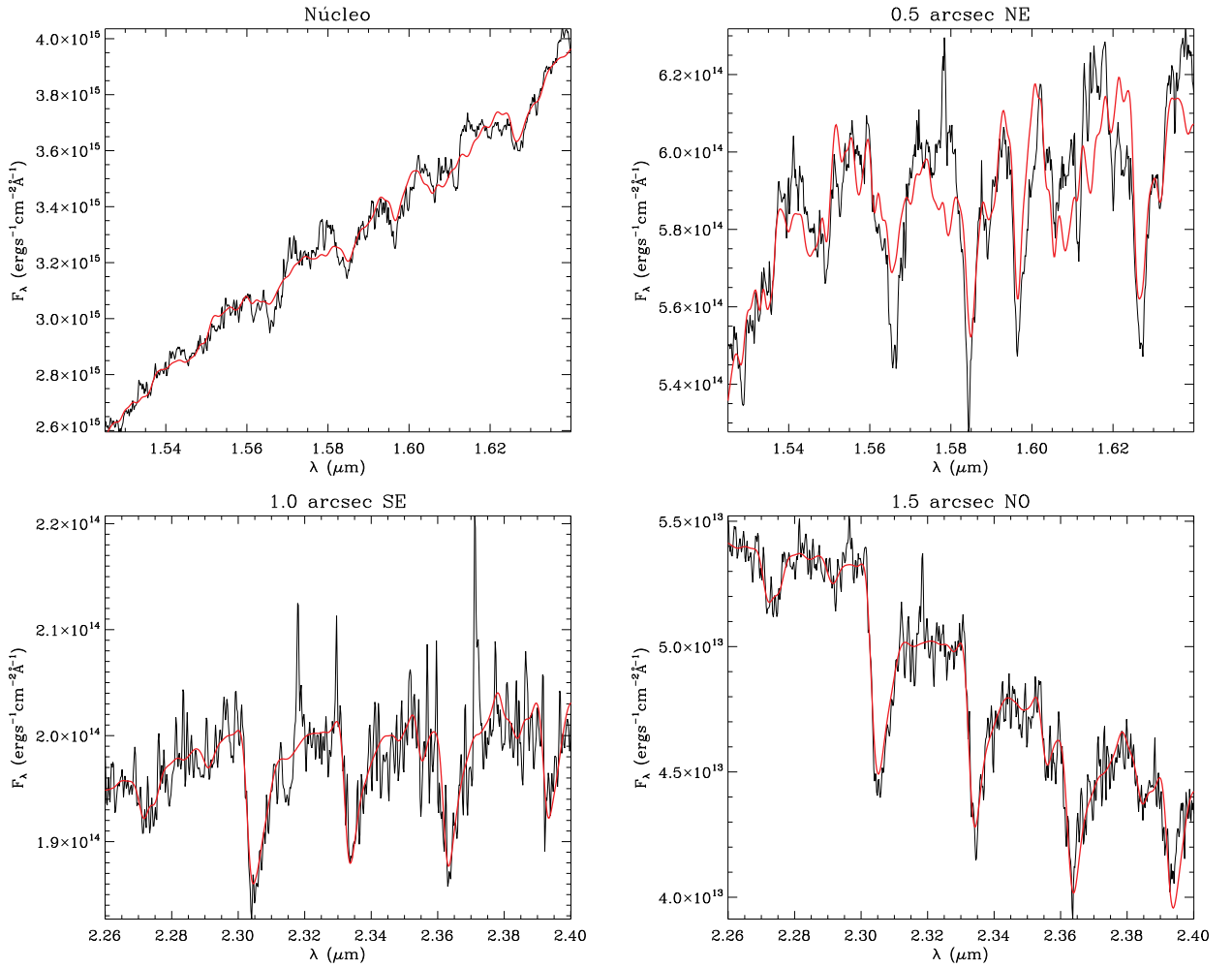


Figura 4.6: Espectros para NGC 1068 em preto e em vermelho, ajustes obtidos com a rotina pPXF.

Na Figura 4.7, apresentamos a combinação dos mapas cinemáticos das bandas H e K. Essa combinação foi feita considerando uma região circular centrada no núcleo com $0.4''$ de raio, na qual erros maiores que 3σ para a banda K foram substituídos por ajustes na banda H. Novamente, há um padrão de rotação para o campo de velocidades radiais (painel superior esquerdo) e uma clara diminuição nos valores de σ_* (painel inferior esquerdo) em regiões próximas ao núcleo indicando que existe um $\sigma_* - drop$ nessa região. Os painéis à direita são medidas dos erros referentes ao campo de velocidades (painel superior) e a σ_* (painel inferior). A escala de cor está em unidades de km s^{-1} em todos os painéis.

Na Figura 4.8 apresentamos nos painéis da esquerda os mapas de h_{3*} e de h_{4*} assim como seus respectivos erros nos painéis à direita, os painéis são resultados da combinação das bandas H e K. Os valores de h_{3*} e h_{4*} são próximos a zero e as incertezas são próximas aos valores, não havendo nenhuma conclusão expressiva.

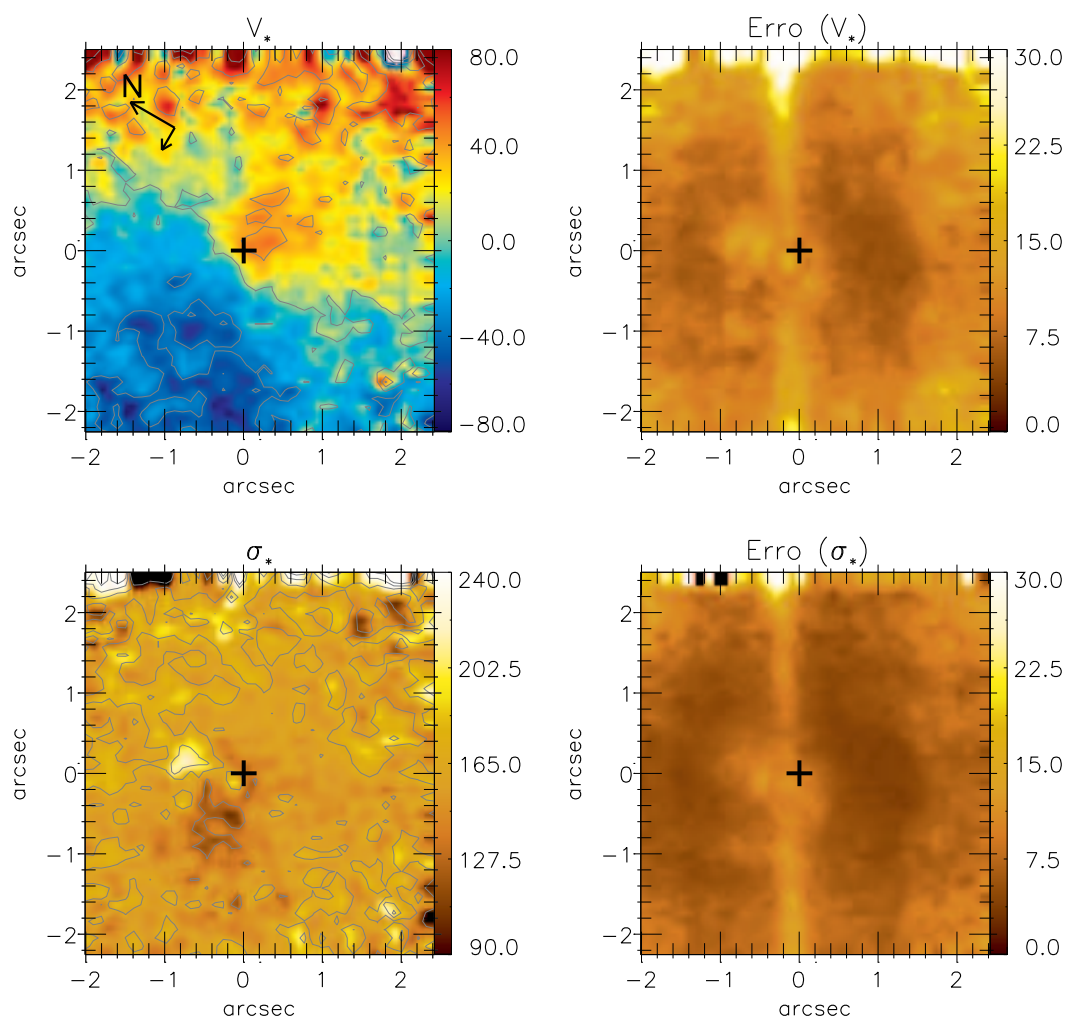


Figura 4.7: Cinemática estelar da galáxia NGC 1068, com as bandas H e K combinadas. No painel superior esquerdo, o campo de velocidades radiais e à direita, as incertezas obtidas no ajuste. No painel inferior esquerdo, a dispersão de velocidades e suas incertezas à direita. Todos os painéis então em unidades de km s^{-1} .

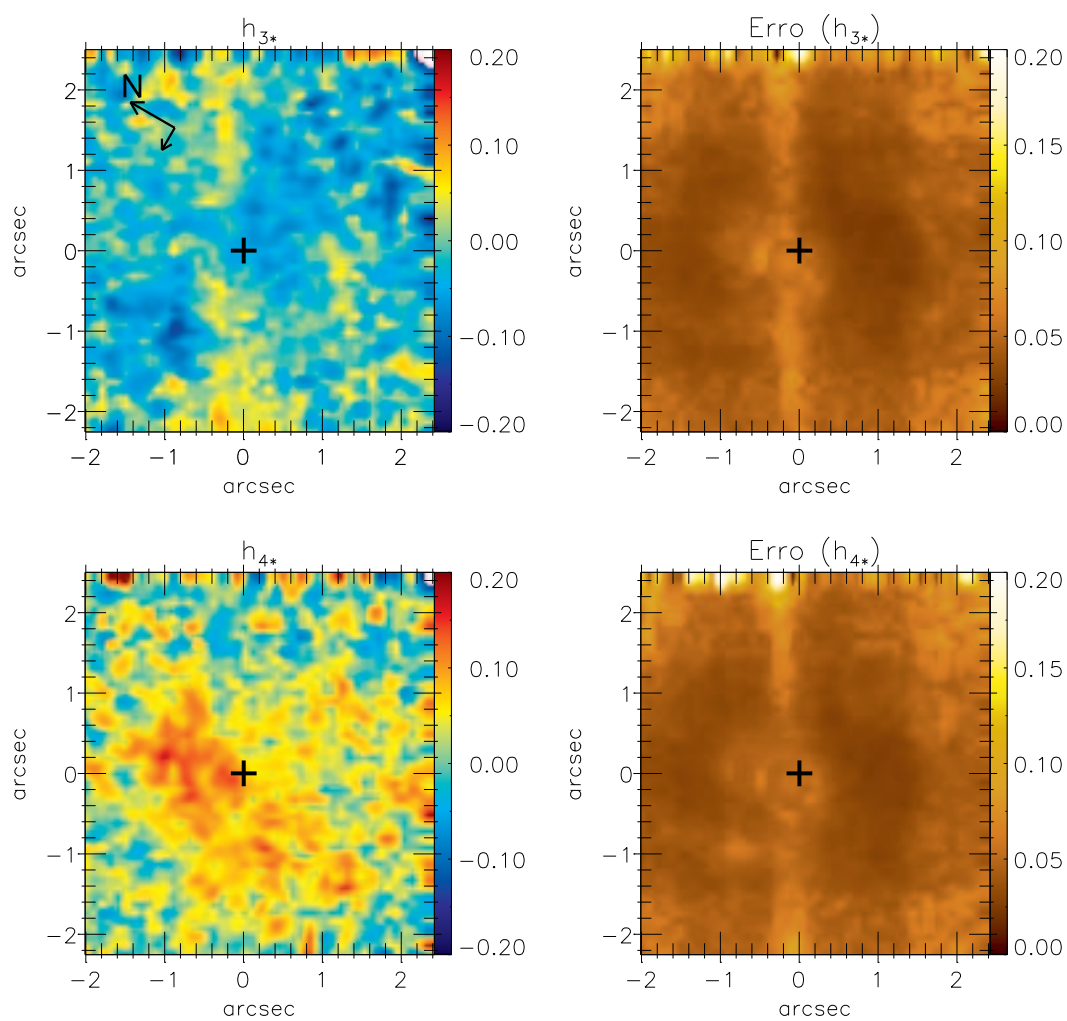


Figura 4.8: Painéis superiores, medidas de h_{3*} (à esquerda) e suas respectivas incertezas (à direita). Painéis inferiores, medidas de h_{4*} (à esquerda) e suas respectivas incertezas (à direita).

Capítulo 5

Resultados: NGC 2110

Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos para a cinemática estelar e do gás, bem como para as distribuições de fluxos para as principais linhas de emissão detectadas nos espectros na banda K desta galáxia.

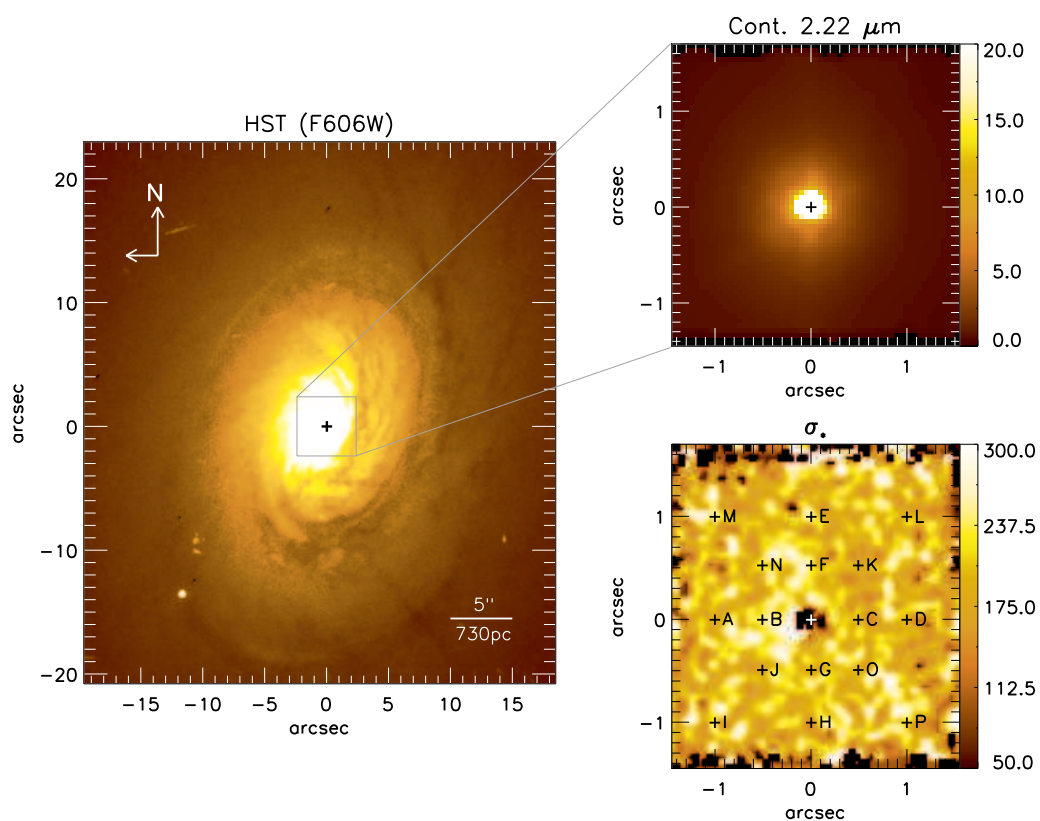


Figura 5.1: Imagem em grande escala da galáxia NGC 2110 no painel da esquerda, obtida com o HST através do filtro F606W. No painel superior direito, uma imagem do contínuo, em unidades de $10^{-18} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a partir de dados observados com o NIFS e no painel inferior direito, o mapa de dispersão de velocidades, em unidades de km s^{-1} , com as posições identificadas de onde foram extraídos espectros, mostrados na Figura 5.2.

No painel inferior direito da Figura 5.1, mostra-se o mapa de dispersão de velocidades estelar, com as posições indicadas de onde foram extraídos alguns espectros. No painel superior direito exibimos uma imagem da emissão contínua centrada em $2.3 \mu\text{m}$ e à esquerda uma imagem em grande escala da galáxia NGC 2110, obtida com o Telescópio Espacial Hubble com a utilização do filtro F606W. Aplicamos uma rotação à imagem para que a mesma tivesse o mesmo ângulo de orientação das observações obtidas com o NIFS. O quadrado no centro da Figura 5.1 corresponde à região analisada com o NIFS com um campo de $\approx 3 \times 3 \text{ arcsec}^2$.

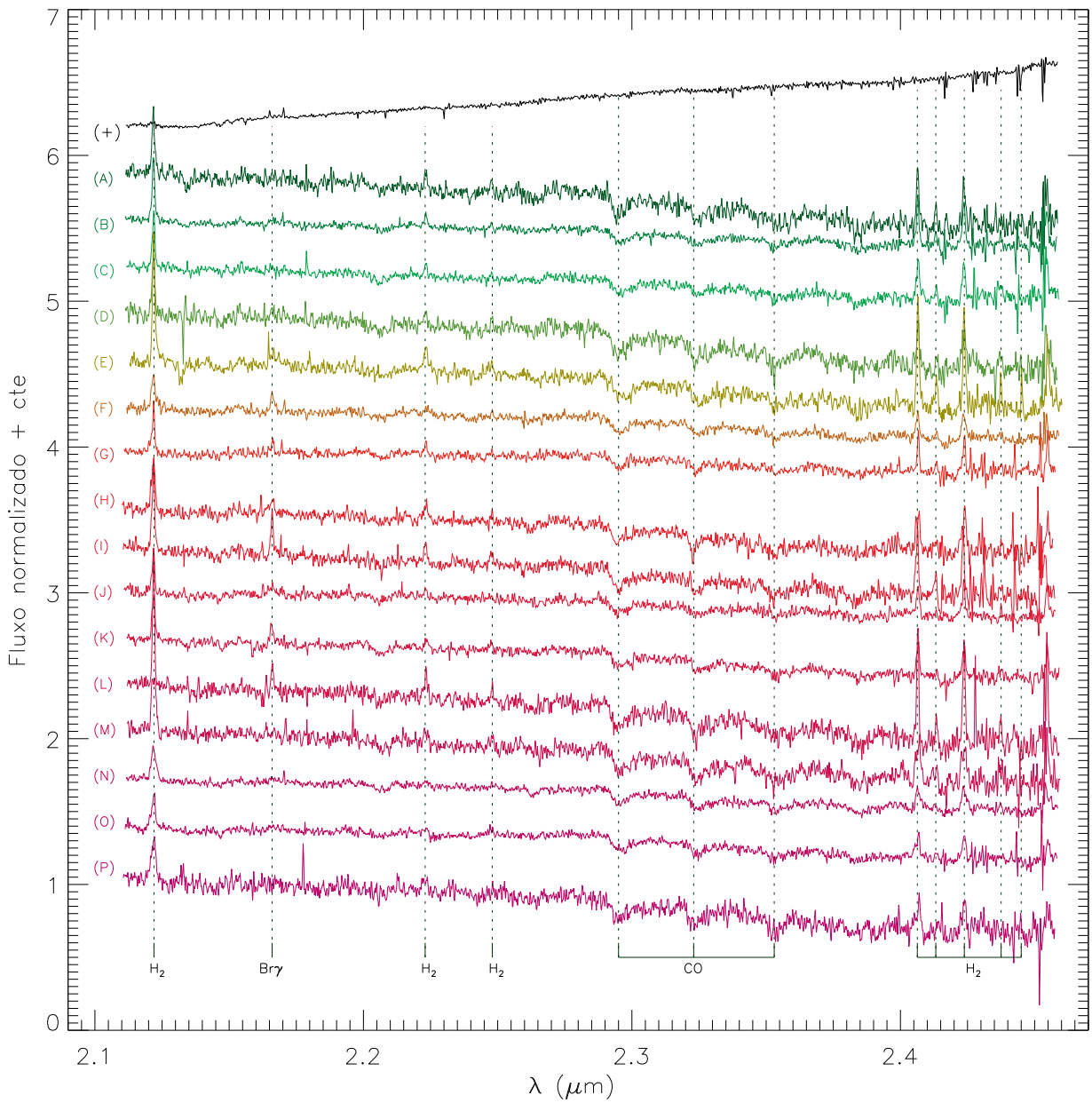


Figura 5.2: Espectros da galáxia NGC 2110 obtidos na banda K com uma abertura de $\approx 0.1'' \times 0.1''$ para as posições indicadas no mapa de dispersão de velocidades na Figura 5.1.

Na Figura 5.2, apresentamos 17 espectros obtidos a partir do cubo de dados da galáxia na banda K para aberturas de $\approx 0.1 \times 0.1$ arcsec². As posições das respectivas extrações estão identificadas na Figura 5.1, onde o símbolo “+” identifica a posição do núcleo. Observamos que há absorções do CO em todos espectros, exceto no núcleo, permitindo, dessa maneira, obter medidas da cinemática estelar para, praticamente, todo o campo de observação da galáxia. Linhas de emissão do hidrogênio molecular estão presentes em diversos espectros de diversas regiões e verifica-se a existência da linha de recombinação do hidrogênio neutro (Br γ) em alguns espectros, além da presença de outras linhas de emissão.

A Tabela 5.1 mostra as medidas para λ_0 (comprimento de onda em laboratório), suas transições e os fluxos de algumas das linhas identificadas na Figura 5.2. Os fluxos foram medidos em duas regiões distintas, uma ao norte e outra ao sudeste do núcleo.

Tabela 5.1: Fluxos das linhas de emissão detectadas a 0.7'' ao norte e 0.4'' ao sudeste do núcleo.

λ_0 (μm)	ID	0.7'' (Norte)	0.4'' (Sudeste)
		Fluxo (10^{-16} erg s ⁻¹ cm ⁻²)	Fluxo (10^{-16} erg s ⁻¹ cm ⁻²)
2.12183	H ₂ 1-0 S(1)	5.95±0.93	5.55±0.86
2.16612	HIBr γ	1.33±0.19	1.12±0.10
2.22344	H ₂ 1-0 S(0)	2.14±0.41	1.14±0.11
2.24776	H ₂ 2-1 S(1)	0.68±0.05	0.83±0.08
2.40847	H ₂ 1-0 Q(1)	4.52±0.57	3.23±0.48
2.41367	H ₂ 1-0 Q(2)	1.54±0.57	0.84±0.10
2.42180	H ₂ 1-0 Q(3)	4.45±0.48	4.24±0.36
2.43697	H ₂ 1-0 Q(4)	1.34±0.18	0.79±0.07
2.45485	H ₂ 1-0 Q(5)	5.04±0.50	2.86±0.26

5.1 Cinemática estelar

Mapas bidimensionais da cinemática estelar são apresentados na Figura 5.3. O campo de velocidade estelar V_* (painel superior esquerdo) apresenta uma amplitude de velocidades de ≈ 200 km s⁻¹ e um padrão de rotação típico com o lado noroeste se aproximando e o lado sudeste se afastando de nós. A velocidade sistêmica da galáxia ($V_s = 2332$ km s⁻¹) foi subtraída do valor da velocidade. A velocidade sistêmica foi obtida pelo ajuste do modelo cinemático ao campo de velocidades (ver Cap. 6).

O mapa da dispersão de velocidades estelar σ_* (painel inferior esquerdo) apresenta valores entre 50 – 300 km s⁻¹. Os erros associados às medidas da velocidade estelar e dispersão de velocidades

são mostrados nos painéis à direita e mostram que os erros variam de 0 a 50 km s^{-1} com valores em torno de 20 km s^{-1} na maioria dos pontos. No núcleo as incertezas são maiores devido à diluição das bandas do CO por poeira e pela emissão do núcleo, não apresentando medidas confiáveis nessa região.

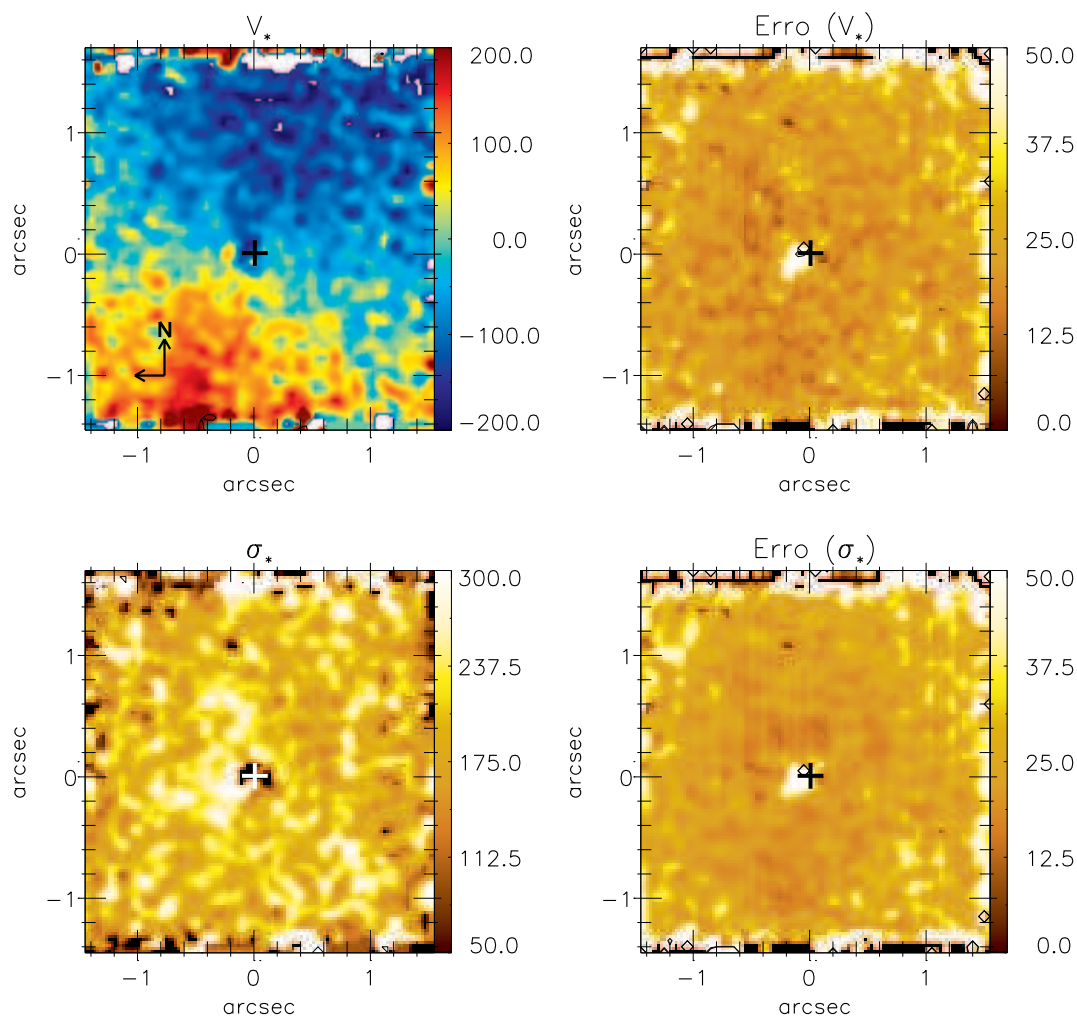


Figura 5.3: Painéis à esquerda correspondem, respectivamente, ao mapa de velocidades estelar (V_*) e da dispersão de velocidades (σ_*), ambos em unidades de km s^{-1} . Painéis à direita correspondem às respectivas incertezas nas medidas.

Na Figura 5.4, nos painéis à esquerda tem-se os momentos de Gauss-Hermite h_{3*} e h_{4*} . Ambos os mapas mostram valores típicos de -0.15 a $+0.15$ indicando que a LSVD das estrelas é razoavelmente bem representada por uma distribuição gaussiana de velocidades. O padrão observado no mapa de h_{3*} é resultante da sobreposição de um disco estelar a um fundo de estrelas (nesse caso, o bojo) com velocidade média zero. Os mapas de erro mostram valores comparáveis às medidas com valores que variam de 0 a 0.15 na maioria dos pontos.

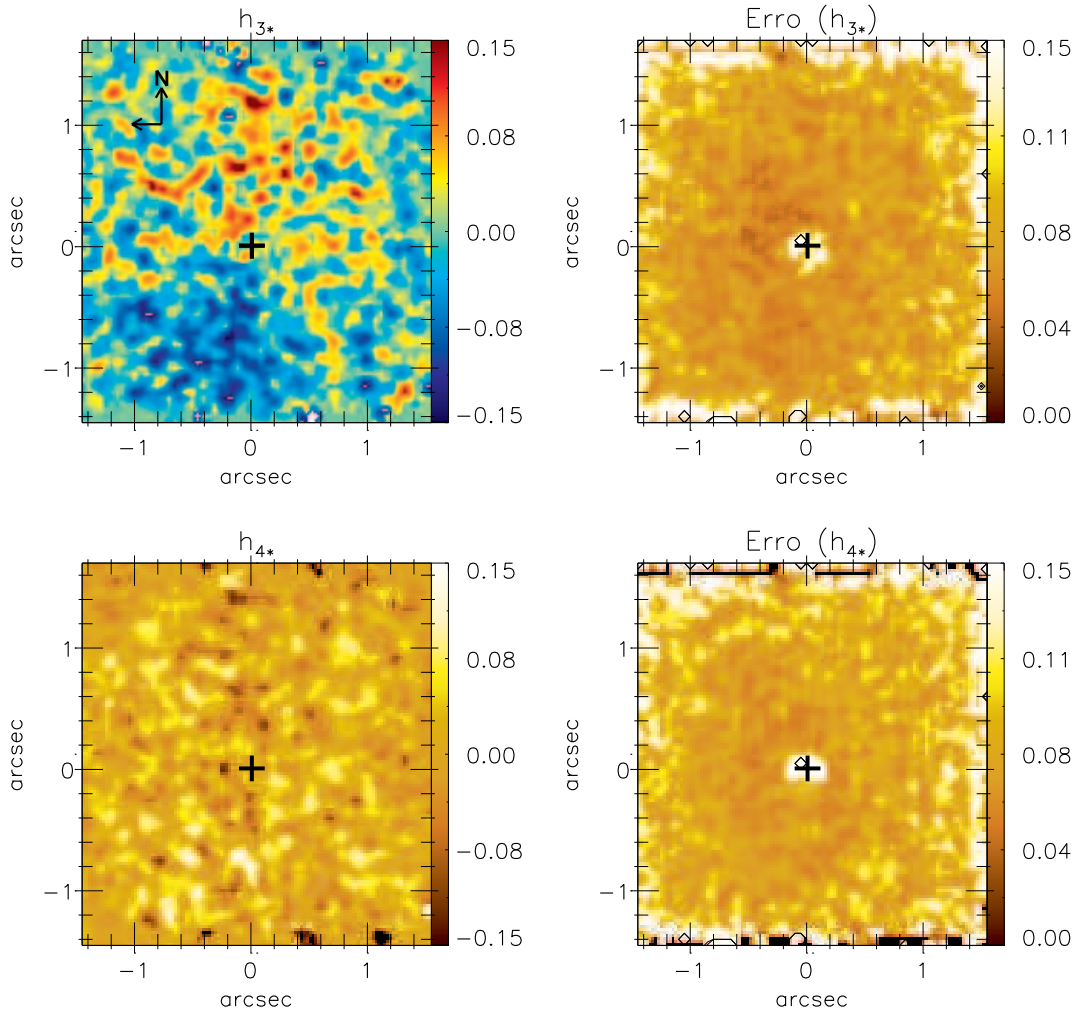


Figura 5.4: Nos painéis à esquerda, medidas de Gauss-Hermite para h_{3*} e h_{4*} e, nos painéis à direita, suas respectivas incertezas.

5.2 A emissão do gás

Na Figura 5.5 apresentamos, nos painéis da esquerda, mapas bidimensionais para os fluxos das linhas de emissão do $H_2\lambda 2.1218\mu\text{m}$ e $\text{Br}\gamma\lambda 2.1661\mu\text{m}$, em unidades de $10^{-17}\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Nos painéis da direita mostramos mapas com os erros percentuais fornecidos pela rotina PROFIT, do ajuste de cada linha de emissão correspondente. No painel superior esquerdo a distribuição de fluxos do $H_2\lambda 2.1218\mu\text{m}$ apresenta uma estrutura com duas regiões brilhantes, uma próxima ao centro e outra a $\approx 0.7''$ ao norte. As distribuições de fluxos para 7 outras linhas de H_2 ($H_2\lambda 2.22344\mu\text{m}$, $H_2\lambda 2.24776\mu\text{m}$, $H_2\lambda 2.40847\mu\text{m}$, $H_2\lambda 2.41367\mu\text{m}$, $H_2\lambda 2.42180\mu\text{m}$, $H_2\lambda 2.43697\mu\text{m}$ e $H_2\lambda 2.45485\mu\text{m}$) são semelhantes a essa, porém mais ruidosas, e não são apresentadas aqui. A distribuição de fluxos do $\text{Br}\gamma\lambda 2.1661\mu\text{m}$ apresenta uma estrutura mais alongada de sudeste para noroeste, também percebe-se um aumento sutil no fluxo a $\approx 0.7''$ e uma intensa emissão

a $\approx 0.4''$ ao nordeste do núcleo. Regiões nos mapas de fluxos que tiveram medidas ruins, com erros acima de 50%, foram descartadas e por isso os mapas apresentam regiões escuras. Nos mapas à direita, correspondentes às incertezas nas medidas, mostra-se que o $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ apresenta excelentes ajustes com erros menores que 30% em, praticamente, toda região analisada. No mapa de erro $\text{Br} \gamma$, as incertezas são da ordem de 20% para a região azul que se estende de sudeste ao noroeste e valores maiores para as demais regiões.

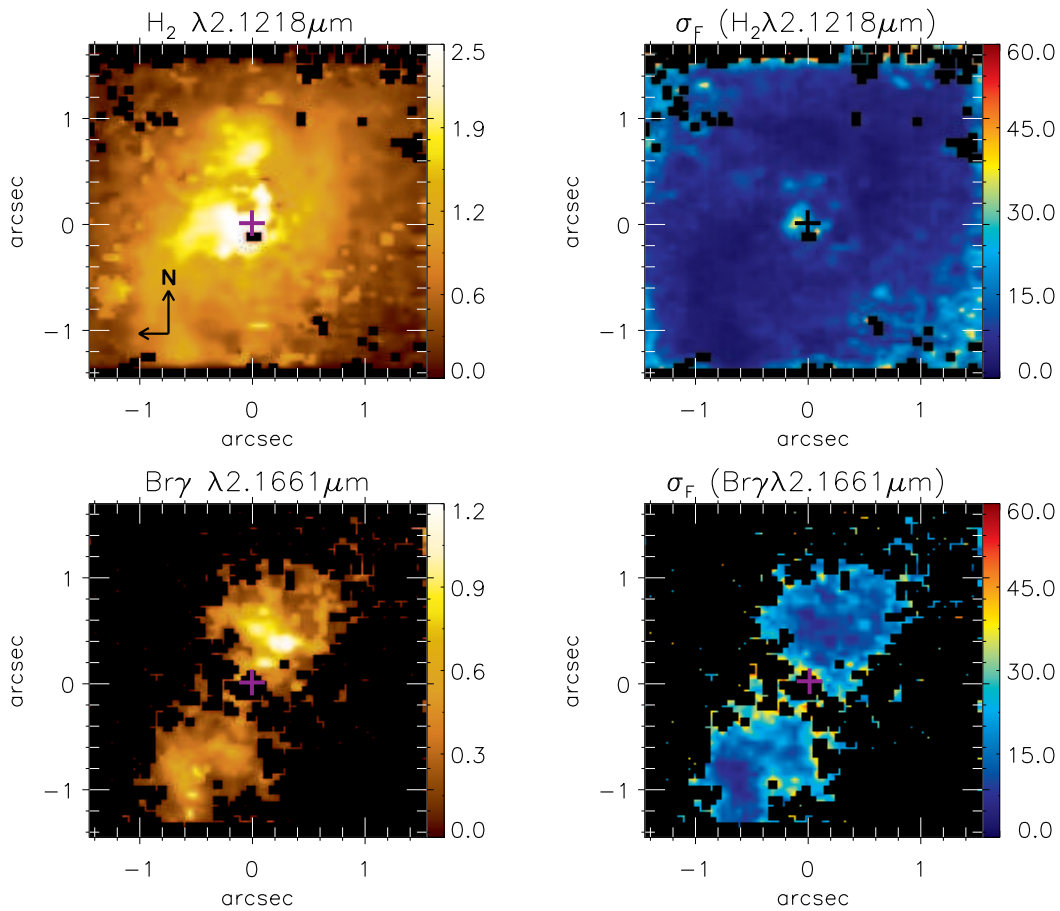


Figura 5.5: Os painéis da esquerda mostram, de cima para baixo, medidas de fluxos para as linhas de emissão do $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ e $\text{Br} \gamma \lambda 2.1661 \mu\text{m}$, em unidades de $10^{-17} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$. Os mapas da direita representam erros percentuais para as medidas das linhas de emissão correspondentes.

Os painéis à esquerda da Figura 5.6 mostram os campos de velocidades, em unidades de km s^{-1} , para as linhas de emissão analisadas, as quais estão identificadas no topo de cada painel. Em ambos os painéis a velocidade sistêmica da galáxia foi subtraída das medidas de velocidades. O painel superior mostra um padrão de rotação para o $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$, com *redshifts* ao sul e *blueshifts* ao norte, de maneira que o gás está se movendo em nossa direção ao norte e na direção oposta ao sul. Adicionalmente, observam-se desvios desse padrão de rotação em forma de espirais ao norte e ao sul. No painel inferior observa-se que o campo de velocidades do $\text{Br} \gamma \lambda 2.1661 \mu\text{m}$ apresenta um padrão

de rotação típico com valores que variam de -250 km s^{-1} a 250 km s^{-1} . Os painéis à direita mostram medidas dos erros, com valores que variam até 30 km s^{-1} .

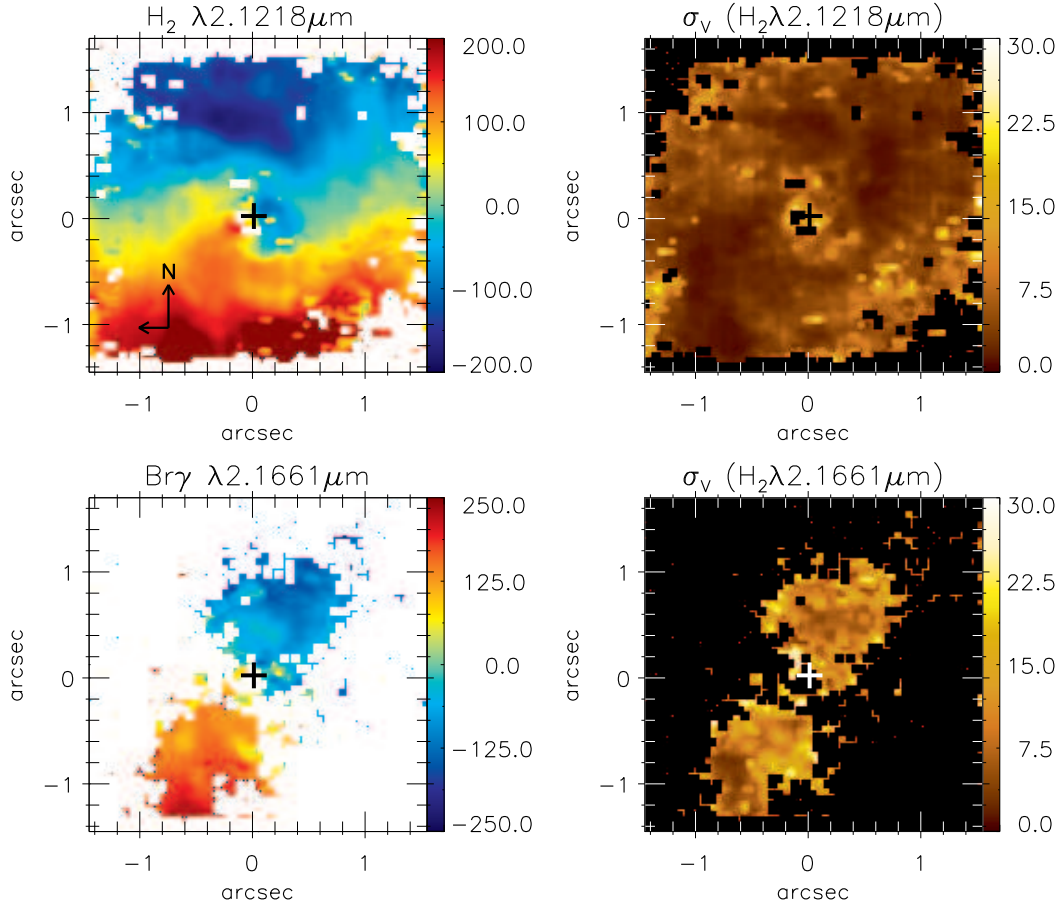


Figura 5.6: Os painéis da esquerda mostram, de cima para baixo, medidas do campo de velocidades, em km s^{-1} para as linhas de emissão do $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ e $\text{Br} \gamma \lambda 2.1661 \mu\text{m}$. Os mapas da direita representam valores dos erros, em km s^{-1} , para as linhas de emissão correspondentes.

Os mapas de dispersão de velocidades, bem como suas respectivas incertezas nas medidas aparecem na Figura 5.7. O mapa de dispersão de velocidades para o H_2 (painel superior esquerdo) mostra uma estrutura ao longo de $\text{PA} \approx -45^\circ$ (de sudoeste para nordeste) com valores maiores. Algumas regiões com medidas menores de dispersão de velocidades são observadas ao norte ($\approx 1''$) e ao longo do eixo maior da galáxia, entre $\approx 0.4''$ e $1.0''$ ao noroeste e próximas a borda do painel ao sudeste do núcleo. O mapa de σ para a linha do $\text{Br} \gamma$ apresenta valores mais altos daqueles encontrados para o hidrogênio molecular, além disso, há uma tendência de valores menores ao sudeste do núcleo.

Na Figura 5.8, os mapas à esquerda correspondem a medidas de h_3 e os mapas à direita a medidas de h_4 para as linhas do H_2 e $\text{Br} \gamma$. No mapa de h_3 para o H_2 , observam-se valores positivos em geral para nordeste e negativos para sudoeste, indicando a presença de asas vermelhas e azuis no perfil da linha nessas regiões, respectivamente. Essas asas indicam que parte do gás possui uma cinemática um

pouco diferente. Valores próximo de zero são observados no mapa de h_4 do hidrogênio molecular, indicando que desvios simétricos do perfil em relação a uma gaussiana não são importantes.

Os mapas de h_3 e h_4 para Br γ são bastante ruidosos e não apresentam padrões simétricos.

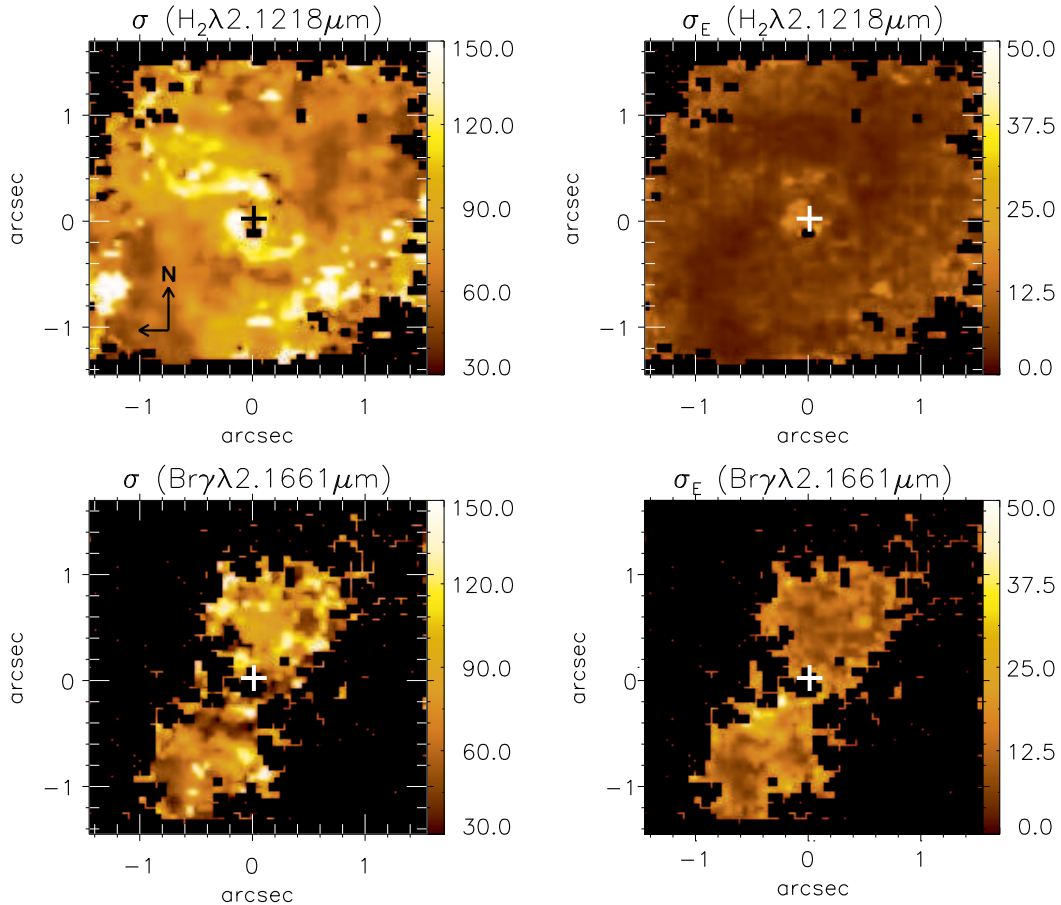


Figura 5.7: Os painéis da esquerda mostram, de cima para baixo, medidas da dispersão de velocidades para as linhas de emissão do H₂ λ2.1218 μm e Br γ λ2.1661 μm. Os mapas da direita mostram valores percentuais dos erros para as linhas de emissão correspondentes.

5.3 Channel maps

Os *channel maps* para as linhas de emissão do H₂ e Br γ são mostrados nas Figuras 5.9 e 5.10, respectivamente. Eles servem para traçar a emissão do gás em diferentes velocidades em regiões próximas ao núcleo. O fluxo, em unidades logarítmicas está representado pela escala de cor à direita da figura. Os valores das velocidades, em unidades de km s⁻¹, são mostrados no canto superior esquerdo de cada painel. Na Figura 5.9 constatamos que o H₂ apresenta velocidades variando de negativas, com *blueshifts* de ≈ -300 km s⁻¹, até positivas, com *redshifts* de ≈ 350 km s⁻¹. Além disso,

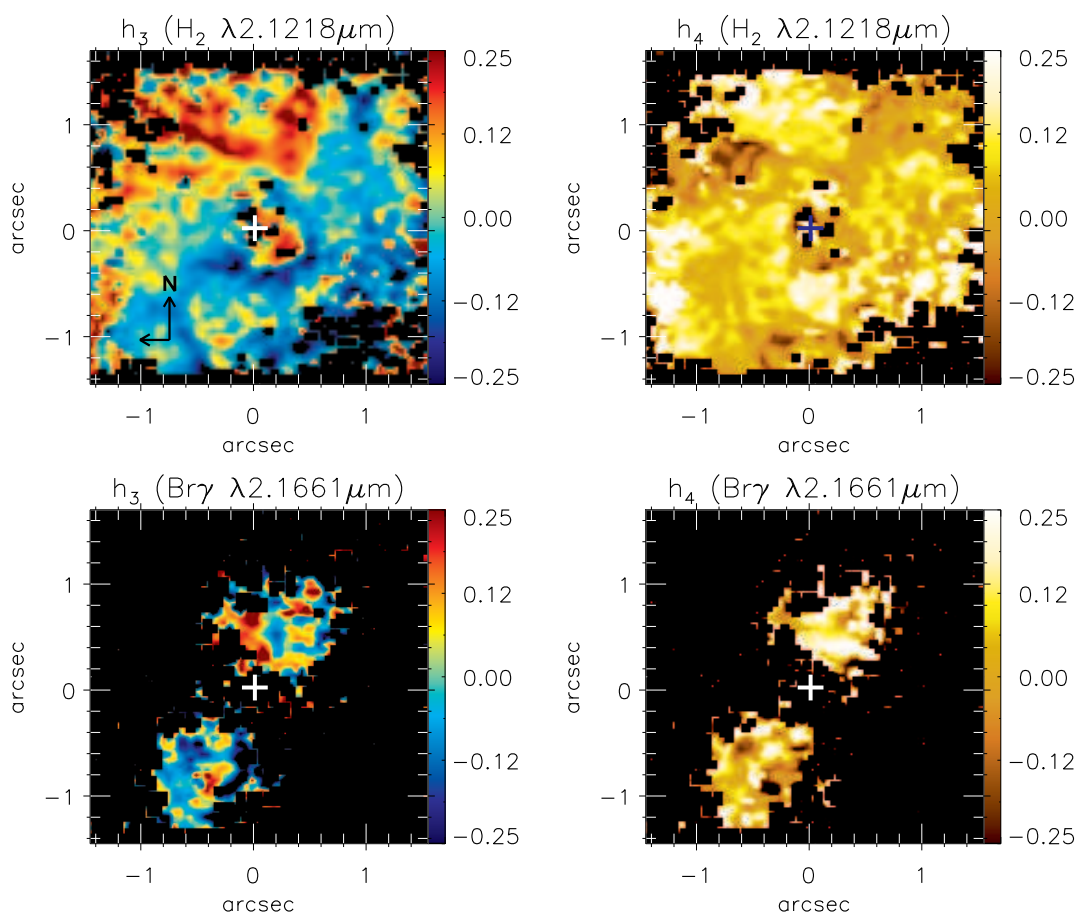


Figura 5.8: Os painéis superiores e inferiores mostram medidas de h_3 (esquerda) e h_4 (direita) para o $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$ e $\text{Br} \gamma \lambda 2.1661 \mu\text{m}$, respectivamente.

o gás molecular tem uma estrutura mais estendida, de leste para oeste, para velocidades próximas a zero e o pico do fluxo desloca-se de noroeste para sudeste.

Na Figura 5.10, mostramos a distribuição em fluxo para diferentes velocidades do $\text{Br} \gamma$. Novamente temos valores de *blueshifts* ao noroeste e *redshifts* ao sudeste, que variam, respectivamente, de $\approx -230 \text{ km s}^{-1}$ até $\approx 300 \text{ km s}^{-1}$

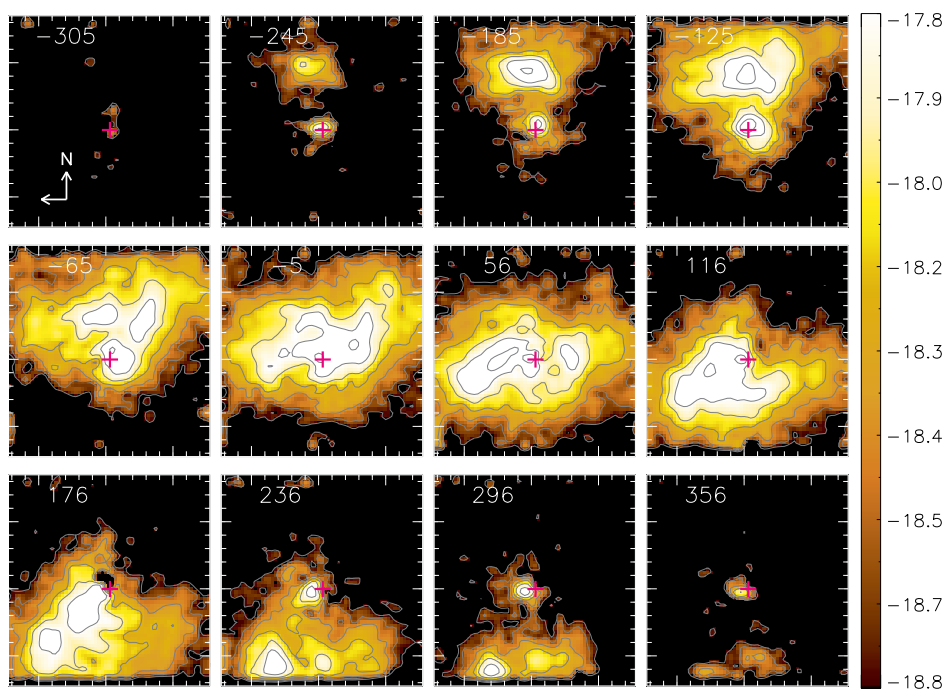


Figura 5.9: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$. O valor da velocidade está no canto superior esquerdo de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

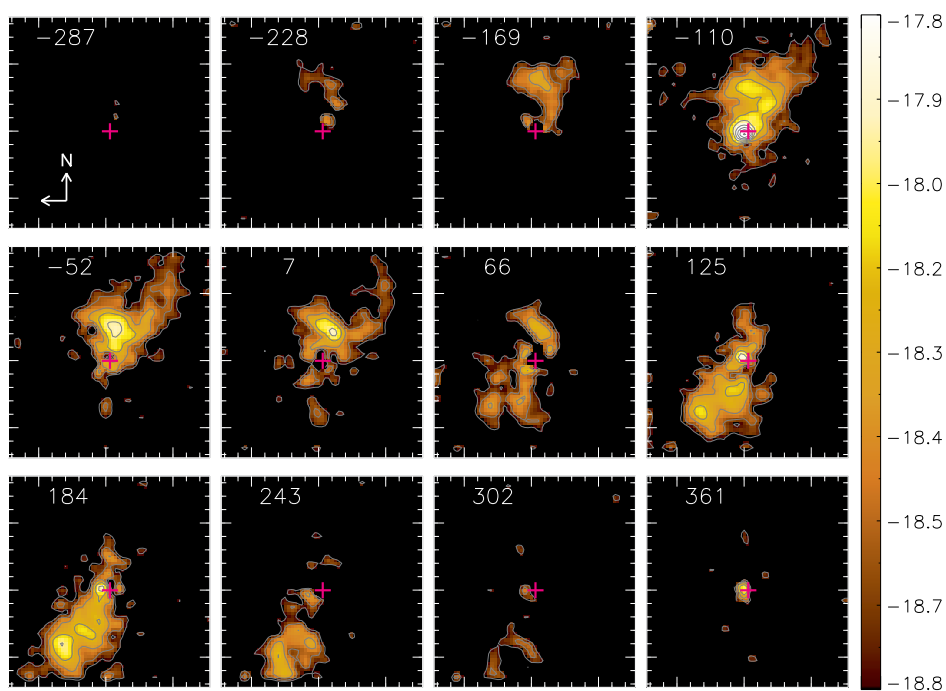


Figura 5.10: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do $\text{Br } \gamma$. A medida da velocidade está no canto superior esquerdo de cada painel, em unidades de km s^{-1} . Intensidades do fluxo estão representadas pela escala de cor em unidades logarítmicas.

Capítulo 6

Discussões: NGC 1068

6.1 Cinemática estelar

A fim de melhor estudar a cinemática estelar em NGC 1068, construímos cortes unidimensionais no campo de velocidades estelar e σ_* mostrados na Figura 4.7. Na Figura 6.1, mostramos esses cortes unidimensionais extraídos do mapa de velocidades radiais (painéis à esquerda) e do mapa de dispersão de velocidades (painéis à direita) ao longo do eixo menor (PA= -10° , painéis superiores) e maior (PA= 80° , painéis inferiores) da galáxia. Calculamos o erro a partir de simulações de Monte Carlo, onde um ruído gaussiano é adicionado aos espectros. As barras de erros correspondem a velocidades entre $10 - 20 \text{ km s}^{-1}$ tanto para as velocidades radiais quanto para a dispersão de velocidades.

No painel inferior esquerdo da Figura 6.1 mostramos uma acentuada curva de rotação com uma variação de $\approx 40 \text{ km s}^{-1}$ ao longo do eixo maior da galáxia localizada a $\approx 140 \text{ pc}$ do núcleo. Um estudo bidimensional sobre a região central da galáxia NGC 1068 (Garcia-Lorenzo et al., 1997) mostrou que existe uma diferença entre a cinemática estelar na região interna a $3''$ em comparação à região mais externa a cerca de $5''$ do núcleo. Os valores encontrados naquele estudo mostram uma amplitude de velocidade de $\approx 50 \text{ km s}^{-1}$ com o eixo maior localizado a $88^\circ \pm 5^\circ$, os quais estão de acordo com os valores encontrados no presente trabalho. Naquele estudo os valores da dispersão de velocidades estão na faixa de $250 - 300 \text{ km s}^{-1}$ os quais são maiores dos obtidos neste trabalho que estão entre $120 - 180 \text{ km s}^{-1}$. Provavelmente essa diferença seja devido à biblioteca de templates estelares e ao método utilizado.

Nossos resultados também estão de acordo com os estudos realizados por Davies et al. (2007), dentre os quais foi encontrado uma diminuição na dispersão de velocidades estelar de 130 km s^{-1} para 70 km s^{-1} em regiões próximas ao núcleo ($1'' - 2''$). Nossos resultados mostram uma diminuição de ≈ 165 a $\approx 125 \text{ km s}^{-1}$ entre $1.5''$ e $0.5''$ (ver Figura 4.7). Novamente, atribuímos a diferença dos resultados devido a biblioteca de templates e ao método utilizado para a obtenção das medidas.

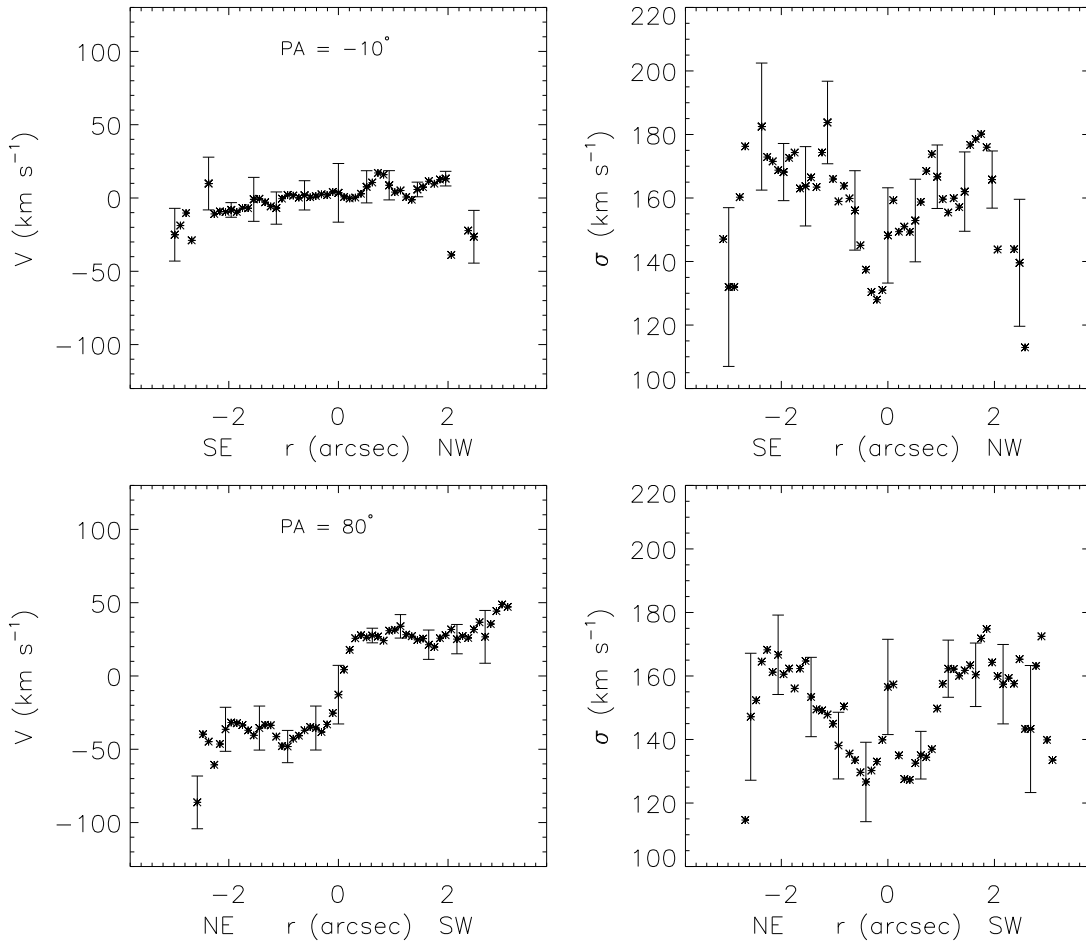


Figura 6.1: Nos painéis da esquerda, velocidades radiais. Nos painéis da direita, dispersão de velocidades. Nos painéis superiores, extrações ao longo do eixo menor e nos painéis inferiores, extrações ao longo do eixo maior da galáxia. As barras de erros correspondem a $10 - 20 \text{ km s}^{-1}$.

A interpretação dada por Davies et al. (2007) para os resultados das velocidades radiais e da dispersão de velocidades é a existência de um disco nuclear frio com $\approx 70 \text{ pc}$ e temperatura de $\approx 100 \text{ K}$, no qual há formação estelar. Essas estrelas recém formadas, têm órbitas preferencialmente no plano da galáxia e não randômicas como as demais estrelas do bojo, portanto, há uma queda nas suas dispersões de velocidades. Isso se deve ao fato de as estrelas terem se formado por um gás localizado no plano da galáxia.

Emsellem et al. (2006) mapearam o campo de velocidades estelar para uma região de $\approx 20''$ da galáxia NGC 1068 utilizando observações no óptico com a unidade de campo integral SAURON. Eles obtiveram resultados similares aos nossos para a dispersão de velocidades estelar com valores de $\approx 150 \text{ km s}^{-1}$ a $\approx 100 \text{ km s}^{-1}$ em uma região interna a $3''$.

6.2 Massa do buraco negro supermassivo

Para calcularmos a massa do BNS, de maneira indireta, podemos utilizar a relação $M_{\bullet} - \sigma_{\star}$, a qual é expressa da seguinte maneira (Graham et al., 2011):

$$\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = (8.13 \pm 0.05) + (5.13 \pm 0.34) \log[\sigma_{\star}/200 \text{ km s}^{-1}], \quad (6.1)$$

onde M_{\bullet} corresponde à massa do buraco negro, M_{\odot} equivale à massa solar e σ_{\star} é a dispersão de velocidades estelar do bojo. Valores típicos para σ_{\star} em NGC 1068 são $\sigma_{\star} = 160 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$, como visto nas Figuras 4.7 e 6.1. Utilizando esses valores encontramos uma massa para o buraco negro de $M_{\bullet} = 4.3_{-3}^{+6} \times 10^7 M_{\odot}$.

Como existe um aumento da dispersão de velocidades próximo ao núcleo e assumindo que tal aumento é devido à influência do potencial gravitacional do BNS, podemos estimar diretamente a massa do BNS a partir do Teorema do Virial, o qual nos diz que: $E_G + 2E_C = 0$, onde E_G é a energia potencial gravitacional, dada por:

$$E_G = \frac{-GmM_{\bullet}}{R} \quad (6.2)$$

e E_C é a energia cinética das estrelas, dada por:

$$E_C = \frac{m\sigma_{\star}^2}{2}. \quad (6.3)$$

Dessa forma a massa do BNS é dada por:

$$M_{\bullet} = \frac{R\sigma_{\star}^2}{G}. \quad (6.4)$$

O valor de σ_{\star} corresponde à dispersão de velocidades no núcleo da galáxia e equivale a $\approx 130 \text{ km s}^{-1}$, o parâmetro R , neste caso, corresponde ao valor da resolução espacial ($\approx 8 \text{ pc}$, uma vez que o aumento em σ_{\star} é observado somente em alguns pixels centrais) e $G = 6.67 \times 10^{-20} \text{ km}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ é a constante gravitacional. Substituindo os valores desses parâmetros na equação acima, encontramos $M_{\bullet} \approx 3.16 \times 10^7 M_{\odot}$. Esse resultado é consistente com o valor acima, obtido com a relação $M_{\bullet} - \sigma_{\star}$.

Esses dois resultados para a massa do BNS podem ser comparados com o obtido por Lodato e Bertin (2003), no qual a massa do buraco negro para a galáxia NGC 1068 foi estimada como sendo $M_{\bullet} = 8.0 \pm 0.3 \times 10^6 M_{\odot}$, a partir de medidas na faixa de microondas de emissões maser da molécula de água. Nossos valores são maiores que os encontrados naquele trabalho. Como a massa do BNS foi estimada fazendo um modelo dinâmico para o disco emissor maser e o raio de influência ($\approx 1 \text{ pc}$) do BNS foi resolvido pelas observações de Lodato e Bertin (2003), a massa obtida por eles é mais precisa.

6.3 Modelo cinemático

Uma vez que o campo de velocidades estelar para a região central da galáxia é dominado por rotação, ajustamos a ele um modelo de rotação com um potencial de Plummer, no qual assumem-se órbitas circulares no plano do disco, a fim de se obter parâmetros físicos como a velocidade sistêmica (V_s), ângulo de orientação da linha dos nodos (Ψ_0), massa do bojo (M) e a posição do centro cinemático. O campo de velocidades foi ajustado a partir da Eq. 3.10, onde mantivemos fixos o centro cinemático e a inclinação do disco (32°), obtida como $i = \cos^{-1}(b/a)$, onde b e a são, respectivamente, os eixos menor e maior da galáxia, disponíveis no NED.

Na Figura 6.2 apresentamos no painel central o modelo cinemático, o qual foi obtido a partir do ajuste do campo de velocidades da Figura 4.7 (painel à esquerda) e no painel à direita o mapa de resíduos (velocidade observada – modelo).

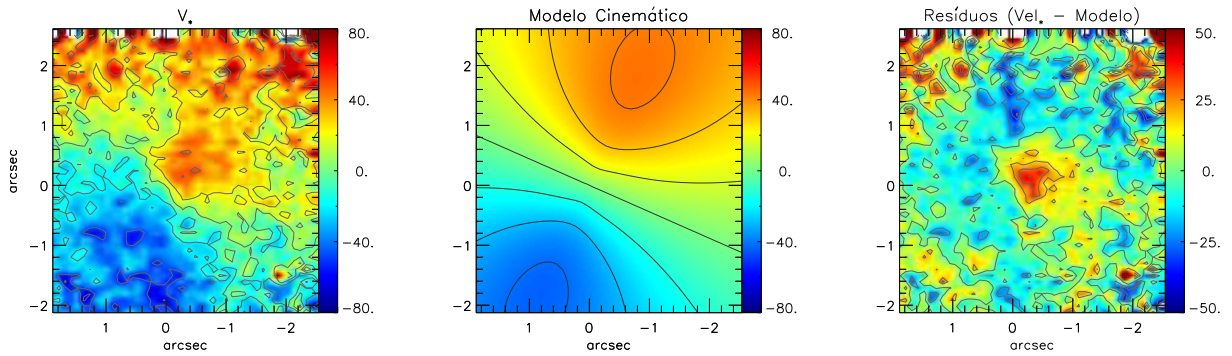


Figura 6.2: No painel à esquerda temos o campo de velocidades estelar em unidades de km s^{-1} , com os *blueshifts* se aproximando e os *redshifts* se afastando de nós. No painel central, o modelo cinemático e no painel à direita, o mapa de resíduos.

Os parâmetros de saída correspondem a $V_s = 1145.6 \pm 15 \text{ km s}^{-1}$, $M = 4.1 \pm 0.3 \times 10^8 M_\odot$, $\Psi_0 = 98.6^\circ \pm 0.8^\circ$, $A = 98.9 \pm 6.5 \text{ pc}$. Observa-se que o modelo cinemático descreve o campo de velocidade das estrelas (V_*) e o mapa de resíduos apresenta valores próximos de zero para a maior parte do campo (com exceção de uma estrutura de resíduos positivos no núcleo). Assim, podemos dizer que o campo de velocidades de NGC 1068 é razoavelmente representado por um modelo cinemático.

O fator de escala encontrado neste trabalho está de acordo com valores típicos de AGNs (Barbosa et al., 2006; Riffel et al., 2008). O valor da velocidade sistêmica está em excelente acordo com aquele encontrado na base de dados NED. O resultado da orientação das linha dos nodos é coincidente com o eixo maior da galáxia, observado na emissão contínua da Figura 4.1. A massa do bojo estimada no presente trabalho está no intervalo de valores observados para outras galáxias ativas (Barbosa et al., 2006; Riffel et al., 2008).

Capítulo 7

Discussões: NGC 2110

7.1 Cinemática estelar

O campo de velocidades radiais apresentado na Figura 5.3 mostra valores de -200km s^{-1} a 200km s^{-1} e um padrão de rotação típico. Estudos da cinemática estelar na região central da galáxia NGC 2110 realizados por González Delgado et al. (2002), a partir de observações espectroscópicas óticas, com IFU e fenda longa ao longo de $PA = 6^\circ$, utilizando as absorções do tripleto de Ca II ($\lambda\lambda$ 8498, 8542, 8662), apresentaram valores para a amplitude do campo de velocidades de -160km s^{-1} a 200km s^{-1} e para a dispersão de velocidades de até $\approx 260\text{km s}^{-1}$. Esses valores concordam com as medidas realizadas no presente trabalho, entretanto, o método utilizado aqui é diferente daquele, no qual apenas duas estrelas gigantes foram utilizadas para se obter medidas da cinemática estelar.

Nossos resultados a respeito da cinemática estelar são comparáveis aos valores encontrados no trabalho de Ferruit et al. (2004), no qual medidas da cinemática estelar foram obtidas a partir de ajustes nas linhas de absorção do Mg e Fe com a IFU do instrumento OASIS do Telescópio Canadá-França-Havaí (CFHT – *Canada-France-Hawaii Telescope*), num intervalo espectral de $4760 - 5560\text{Å}$. Os autores também ajustaram bandas de absorção do CO no IV próximo a partir de espectroscopia de fenda longa com o instrumento NIRSPEC do Telescópio Keck-II.

A fim de se obter alguns parâmetros físicos para a galáxia e já que a mesma apresenta um padrão de rotação para o campo de velocidades das estrelas, ajustamos um modelo de rotação com um potencial de Plummer. Nenhum dos sete parâmetros de entrada foi mantido fixo, dessa forma, obtivemos os seguintes resultados: velocidade sistêmica heliocêntrica ($V_s = 2334.2 \pm 15\text{km s}^{-1}$), massa do bojo ($M = 2.8 \pm 0.2 \times 10^9 M_\odot$), ângulo de posição da linha dos nodos ($\Psi_0 = 161.4^\circ \pm 0.7^\circ$), fator de escala projetado no plano do céu ($A = 119.8 \pm 6.8\text{pc}$), inclinação ($i = 45.1^\circ \pm 2.0^\circ$), centro cinemático ($X_0 = 15.7 \pm 3.1\text{pc}$ e $Y_0 = -7.8 \pm 3.3\text{pc}$).

A Figura 7.1 mostra que o campo de velocidades é bem ajustado pelo modelo cinemático (painel central) e o mapa de resíduos apresenta valores entre -50 a 50 km s^{-1} sem a presença de resíduo sistemático aparente.

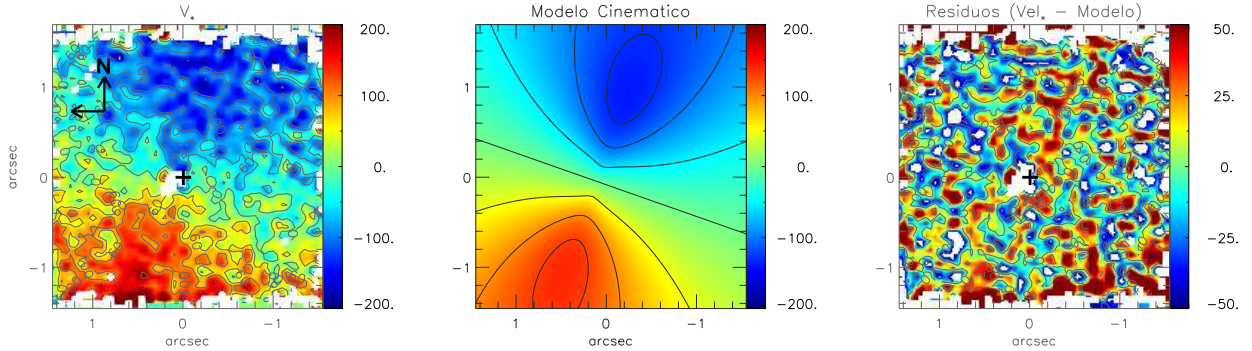


Figura 7.1: No painel à esquerda, o campo de velocidades estelar, no centro, o ajuste do modelo cinemático e no painel à direita o mapa de resíduos. As escalas de cores estão em unidades de km s^{-1} , os *blueshifts* e *redshifts* se aproximam e se afastam de nós, respectivamente.

Os valores da velocidade sistêmica e inclinação do disco estão de acordo com aqueles encontrados na base de dados NED. O valor do ângulo de posição da linha dos nodos concorda com o valor encontrado em González Delgado et al. (2002), no qual $\text{PA} = 163^\circ$ e o parâmetro de escala e a massa do bojo encontradas no presente trabalho estão de acordo com valores típicos para galáxias Seyfert (Barbosa et al., 2006; Riffel et al., 2008, 2009; Riffel; Storchi-Bergmann, 2011a).

O valor médio para dispersão de velocidades das estrelas obtido da Figura 5.3 é $\sigma_* = 200 \pm 20 \text{ km s}^{-1}$. Substituindo esse valor na relação $M_\bullet - \sigma_*$ (Eq. 6.1) obtemos que a massa do BNS é $M_\bullet = 1.3^{+2.5}_{-0.7} \times 10^8 M_\odot$. Esse valor está de acordo com o encontrado por Moran et al. (2007), que obtiveram $M_\bullet = 2 \times 10^8 M_\odot$, a partir da relação $M_\bullet - \sigma_*$ com medidas da dispersão de velocidades no óptico.

7.2 Excitação do gás

Como foi dito na introdução, o H_2 pode ser excitado por processos térmicos como interações devido a choques, aquecimento do gás pela interação com a fonte rádio, emissão de raios-X e por processos não térmicos como a absorção de fótons na faixa do UV.

O mapa de fluxo do $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$, apresentado na Figura 5.5, mostra uma região peculiar com intensa emissão ao norte do núcleo ($\approx 0.7''$). Com o objetivo de verificar qual é a origem dessa emissão, buscamos, num primeiro momento, estimar o mecanismo de excitação do H_2 nessa região.

Para determinarmos se a excitação do H_2 , nessa região, é devido a processos térmicos ou não térmicos, podemos determinar a temperatura de excitação a partir da seguinte expressão matemática na banda K (Wilman; Edge; Johnstone, 2005; Storchi-Bergmann et al., 2009; Riffel; Storchi-Bergmann; Nagar, 2010):

$$\log \left(\frac{F_i \lambda_i}{A_i g_i} \right) = \text{const.} - \frac{T_i}{T_{\text{exc}}}, \quad (7.1)$$

onde F_i é o fluxo da $i^{\text{ésima}}$ linha do H_2 , λ_i é o seu comprimento de onda, A_i é o coeficiente de emissão espontânea, g_i é o peso estatístico do nível superior da transição, T_i é a energia do nível expressa em função da temperatura e T_{exc} corresponde a temperatura de excitação. Na relação matemática acima assume-se uma razão de abundância *ortho:para* de 3 : 1.

A partir do ajuste da equação acima aos dados, podemos verificar se o mecanismo de excitação é devido a processos térmicos (a equação apresenta um bom ajuste aos dados) ou não térmico (a equação não é capaz de reproduzir a emissão).

Com exceção do fluxo, todos os parâmetros da Eq. 7.1 são grandezas tabeladas as quais foram obtidas de www.astronomy.ohio-state.edu/~deppy/research/observing/molhyd.htm.

Realizamos medidas para os fluxos das linhas de emissão a partir de espectros extraídos em duas regiões, a $0.4''$ sudeste do núcleo e $0.7''$ norte do mesmo, para aberturas de $0.25''$ de raio. A última posição representa a localização da estrutura observada no mapa de fluxo do H_2 descrito acima e a primeira representa um espectro típico. Na Tabela 5.1 apresentamos medidas de fluxos para as duas posições.

Na Figura 7.2 o eixo das abscissas corresponde à energia do nível em função da temperatura e o eixo das ordenadas representa a população eletrônica do nível, onde $N_{\text{upp}} = F_i \lambda_i / A_i g_i$. Essa Figura mostra os ajustes obtidos para cada região analisada. Na região ao sudeste do núcleo (imagem à esquerda) a temperatura de excitação resultante é $T_{\text{exc}} = 2644 \pm 249$ K e na região ao norte do núcleo (imagem à direita) a temperatura de excitação obtida foi $T_{\text{exc}} = 2133 \pm 118$ K. O ajuste da reta nos pontos é bom, significando que o H_2 está em equilíbrio térmico e indicando processos térmicos como principal mecanismo de excitação.

Construímos mapas para as razões entre as intensidades das linhas $H_2 \lambda 2.1218 / Br\gamma$ e $H_2 \lambda 2.2477 / H_2 \lambda 2.1218$, com o objetivo de verificar a natureza da emissão do H_2 . O mapa da primeira razão de linhas é mostrado na Figura 7.3. Observamos que os valores variam de 0.5 a 5.0 e a maior parte deles apresenta valores menores que 2, característicos de galáxias Seyfert (Rodríguez-Ardila et al., 2004; Rodríguez-Ardila; Riffel; Pastoriza, 2005). O mapa das razões também apresenta regiões com valores mais altos próximos às bordas da estrutura. Isso se deve ao fato de haver um aumento na emissão do gás molecular, provavelmente, devido ao aquecimento desse por raios-X provenientes do núcleo ativo. A razão entre $H_2 \lambda 2.2477 / H_2 \lambda 2.1218$ resultou em ≈ 0.1 na maior parte

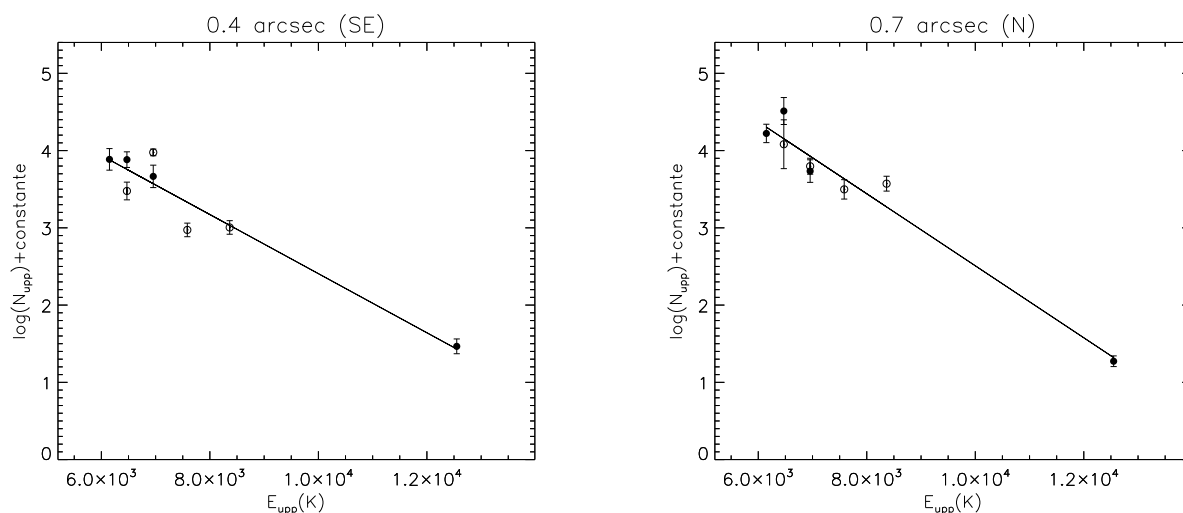


Figura 7.2: Relação entre N_{upp} e E_{upp} para a emissão das linhas do hidrogênio molecular em duas regiões distintas, uma a $0.4''$, ao sudeste do núcleo (imagem da esquerda) e outra a $0.7''$, ao norte do núcleo (imagem da direita). Transições *para* estão representadas por círculos vazios e transições *ortho* são mostradas como círculos preenchidos.

do campo (e não é mostrada), indicando processos térmicos como o mecanismo de excitação do H_2 (Rodríguez-Ardila et al., 2004; Rodríguez-Ardila; Riffel; Pastoriza, 2005; Storchi-Bergmann et al., 2009).

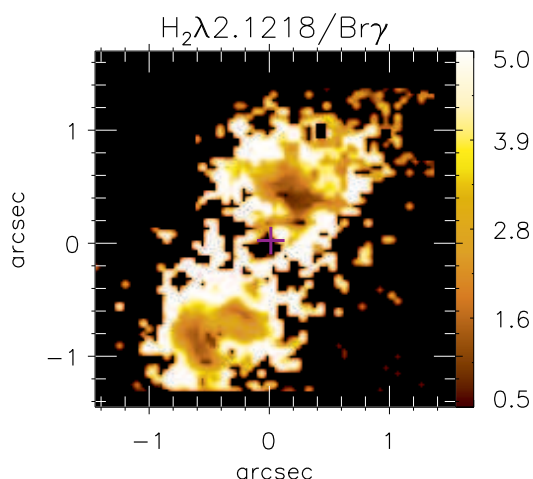


Figura 7.3: Mapa da razão entre as intensidades das linhas de emissão do $\text{H}_2 \lambda 2.1218$ e do $\text{Br} \gamma$.

Os resultados acima mostram que os processos térmicos são responsáveis tanto pela emissão da região com aumento de fluxo quanto para qualquer outra região típica, indicando que esse é o principal mecanismo de excitação molecular nessa galáxia.

7.3 Massa do gás molecular e massa do gás ionizado

A massa de hidrogênio molecular pode ser estimada, em unidades de massas solares, segundo a equação (Scoville et al., 1982 apud Riffel et al., 2008):

$$M_{\text{H}_2} = \frac{2m_p F_{\text{H}_2\lambda 2.1218} 4\pi d^2}{f_{v=1,J=3} A_{S(1)} h\nu}, \quad (7.2)$$

onde, m_p é a massa do próton (1.673×10^{-24} g), $F_{\text{H}_2\lambda 2.1218}$ é o fluxo da linha de emissão $\text{H}_2\lambda 2.1218\mu\text{m}$, d é a distância até a galáxia, h é a constante de Planck (6.6×10^{-27} erg s) e ν é a frequência da linha (1.413×10^{14} Hz). Para a temperatura vibracional típica de $T_{\text{vib}} = 2000$ K (Storchi-Bergmann et al., 2009), a fração de população é $f_{v=1,J=3} = 1.22 \times 10^{-2}$ e a probabilidade de transição é $A_{S(1)} = 3.47 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (Turner; Kirby-Docken; Dalgarno, 1977 apud Riffel et al., 2008). Substituindo os valores acima na Eq. 7.2 e reescrevendo-a, temos:

$$M_{\text{H}_2} \approx 5.0776 \times 10^{13} \left(\frac{F_{\text{H}_2\lambda 2.1218}}{\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}} \right) \left(\frac{d}{\text{Mpc}} \right)^2 [\text{M}_\odot]. \quad (7.3)$$

Integrando sobre todo o campo do NIFS, obtemos $F_{\text{H}_2\lambda 2.1218} \approx 3.1 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, que resulta em uma massa de hidrogênio molecular de $\approx 1.4 \times 10^3 \text{ M}_\odot$, que concorda com estudos anteriores para outras galáxias ativas (Riffel et al., 2008; Storchi-Bergmann et al., 2009).

A massa de H_2 encontrada no cálculo acima está associada ao gás quente emitido no IV próximo e não ao gás frio presente na galáxia, o qual representa a maior parte de gás molecular (Storchi-Bergmann et al., 2009). Podemos estimar a massa de gás molecular frio a partir da luminosidade da linha $\text{H}_2\lambda 2.1218\mu\text{m}$ pela seguinte relação matemática (Mazzalay et al., 2012):

$$\frac{M_{\text{fria}}}{\text{M}_\odot} \approx 1174 \times \frac{L_{\text{H}_2\lambda 2.1218}}{L_\odot}. \quad (7.4)$$

Utilizando o fluxo para a linha $\text{H}_2\lambda 2.1218\mu\text{m}$ acima e uma distância $d = 9.32 \times 10^{25}$ cm, encontramos $L_{\text{H}_2\lambda 2.1218} = F_{\text{H}_2\lambda 2.1218} 4\pi d^2 \approx 3.38 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$. Substituindo esse valor na Eq. 7.4, obtemos $M_{\text{fria}} \approx 9.92 \times 10^8 \text{ M}_\odot$. Portanto, a massa de gás molecular frio é aproximadamente 6 ordens de grandeza maior que a massa do gás quente.

A partir da emissão do $\text{Br}\gamma$ podemos calcular a massa de hidrogênio ionizado. Para esse cálculo é conveniente utilizarmos a luminosidade da linha de recombinação $\text{H}\beta$, que pode ser escrita como (Osterbrock; Ferland, 2006):

$$L(\text{H}\beta) = N_e N_p \alpha_{\text{H}\beta}^{\text{eff}} h\nu_{\text{H}\beta} V, \quad (7.5)$$

onde N_e é a densidade eletrônica, N_p é a densidade de prótons, $\alpha_{\text{H}\beta}^{\text{eff}}$ é o coeficiente efetivo de recombinação para o H β , h é a constante de Planck, $\nu_{\text{H}\beta}$ é a frequência da linha H β e V é o volume. Se multiplicarmos o número de prótons por cm^{-3} (N_p) pela massa de cada próton (m_p) temos a densidade de massa total, $N = N_p m_p$. Isolando e substituindo N_p na Equação 7.5, temos que:

$$L(\text{H}\beta) = N_e \alpha_{\text{H}\beta}^{\text{eff}} h \nu_{\text{H}\beta} \frac{NV}{m_p}. \quad (7.6)$$

O produto NV equivale a massa de hidrogênio ionizado (M_{HII}), localizado na região de volume V . Reescrevendo a Equação 7.6 e isolando M_{HII} , obtemos

$$M_{\text{HII}} = \frac{m_p L(\text{H}\beta)}{N_e \alpha_{\text{H}\beta}^{\text{eff}} h \nu_{\text{H}\beta}}. \quad (7.7)$$

Utilizando as relações matemáticas $F_{\text{H}\beta} = 35.9 F_{\text{Br}\gamma}$ e $L(\text{H}\beta) = 4\pi d^2 F_{\text{H}\beta}$ e assumindo o caso B de recombinação com temperatura efetiva $T_e = 10^4$ K e densidade $10^2 < N_e < 10^4 \text{ cm}^{-3}$ (Osterbrock; Ferland, 2006), podemos escrever a massa de hidrogênio ionizado da seguinte forma:

$$M_{\text{HII}} = \frac{m_p 4\pi d^2 35.9 F_{\text{Br}\gamma}}{N_e \alpha_{\text{H}\beta}^{\text{eff}} h \nu_{\text{H}\beta}}. \quad (7.8)$$

O valor do fluxo foi obtido integrando sobre todo o campo do NIFS e corresponde a $F_{\text{Br}\gamma} = 6.5 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Substituindo os valores de $m_p = 1.673 \times 10^{-24} \text{ g}$, $d = 9.32 \times 10^{25} \text{ cm}$, $\alpha_{\text{H}\beta}^{\text{eff}} = 3.02 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$, $h = 6.6 \times 10^{-27} \text{ erg s}$, $\nu_{\text{H}\beta} = 6.17157 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ e assumindo $N_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ na Eq. 7.8, encontramos a massa de hidrogênio ionizado como sendo $M_{\text{HII}} \approx 1.7 \times 10^6 M_{\odot}$. Esse valor está de acordo com os resultados encontrados na literatura (Riffel et al., 2008; Storchi-Bergmann et al., 2009). A massa de gás ionizado é 3 ordens de grandeza menor do que a massa de gás molecular total, o que também está de acordo com resultados obtidos para outras galáxias ativas.

7.4 Cinemática do gás

O campo de velocidades do H $_2$ (Figura 5.6) mostra tanto *blueshifts* quanto *redshifts*, que são compatíveis com o que foi chamado de “gás morno” no trabalho de Müller, Storchi-Bergmann e Nagar (2012). Os *blueshifts* observados ao nordeste do núcleo parecem estar associado com esse “gás morno”.

Como já observado, o campo de velocidades do gás apresenta um padrão de rotação, entretanto, ele difere daquele observado para as estrelas. Percebe-se assimetrias que são interpretadas como desvios da rotação. A fim de isolar tais assimetrias construímos mapas de resíduos, os quais foram

obtidos a partir da subtração do campo de velocidades do H_2 e do $Br\gamma$ do modelo cinemático obtido para o campo de velocidades estelar (painel central da Figura 7.1). Os mapas de resíduos são apresentados na Figura 7.4, na qual o painel da esquerda corresponde aos resíduos para o H_2 e o painel da direita aos resíduos para o $Br\gamma$. O mapa de resíduos do $Br\gamma$ apresenta uma estrutura em *redshift* a $\approx 0.5''$ ao norte do núcleo que também é observada no mapa de resíduos de H_2 .

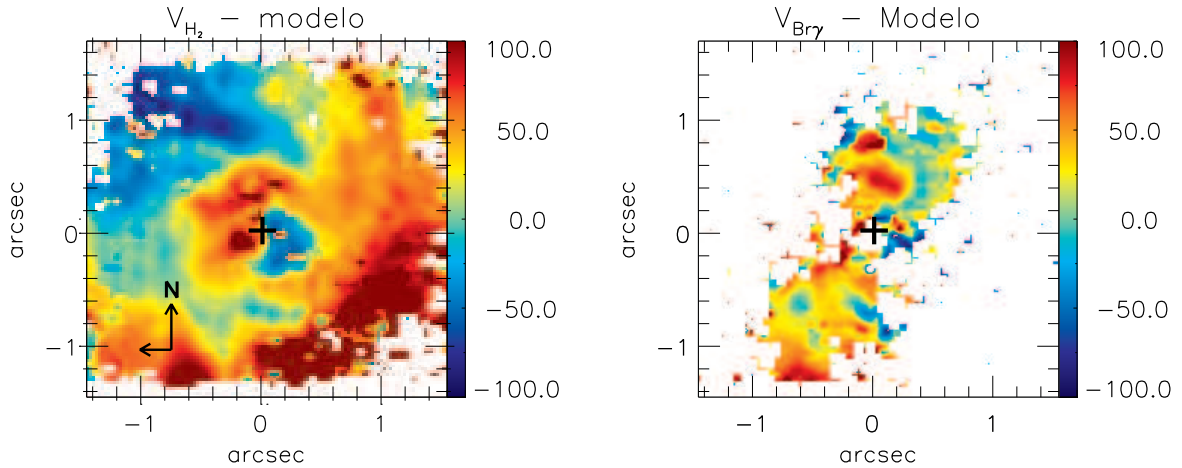


Figura 7.4: Mapas de resíduos do H_2 e $Br\gamma$.

Assumindo que a galáxia é do tipo *trailing*, ou seja, os braços espirais apresentam um enrolamento similar ao esperado se eles fossem produzidos devido à rotação da galáxia e combinando essa suposição com o campo de velocidades observado (Figura 5.6), concluímos que os lados próximo e o distante da galáxia estão a oeste e leste, respectivamente.

No mapa de resíduos do H_2 observam-se braços espirais nos lados próximo e distante da galáxia, caracterizados por *blueshifts* ao nordeste e *redshifts* ao sudoeste. Interpretamos esses *blueshifts* e *redshifts* como sendo originados pela emissão do gás no plano da galáxia em direção ao núcleo. O mapa de resíduos do hidrogênio molecular ainda mostra *outflows* nucleares ao longo do eixo menor da galáxia, de leste para oeste. Os *outflows* são observados no lado próximo em *blueshifts* e no lado distante em *redshifts* ambos em regiões internas a $\approx 0.4''$. Observações realizadas no óptico com o HST de NGC 2110, a partir de espectroscopia de fenda longa e imagens de banda estreita mostraram o mesmo *outflow* nuclear (González Delgado et al., 2002; Rosario et al., 2010). Observações recentes de IFU no óptico também sugerem a presença desse *outflow* nuclear (Müller; Storchi-Bergmann; Nagar, 2012).

7.4.1 Taxa de *inflow*

A taxa de *inflow* do gás molecular na região central através de uma seção transversal pode ser obtida pela seguinte expressão matemática:

$$\dot{M}_{\text{H}_2} = 2m_{\text{p}}N_{\text{H}_2}v\pi r^2n_{\text{arms}}, \quad (7.9)$$

onde m_{p} é a massa do próton, $v = v_{\text{obs}}/\text{sen } i$, equivale à velocidade do gás em *inflow* no plano da galáxia, $v_{\text{obs}} = 80 \text{ km s}^{-1}$ é a velocidade observada diretamente no mapa de resíduos do H_2 (Figura 7.4) e $i = 42^\circ$ corresponde à inclinação do disco em relação ao plano do céu (González Delgado et al., 2002). Para calcular a taxa de *inflow* assumimos $r = 0.3'' (\approx 48 \text{ pc})$ como o raio de uma seção transversal circular localizada a $1''$ do núcleo, N_{H_2} é a densidade de gás molecular e $n_{\text{arms}} = 2$ é o número de braços espirais observados. Resta-nos estimar a densidade de H_2 que pode ser obtida supondo que o gás molecular está localizado em um disco com raio $r_{\text{d}} = 1.5'' (237 \text{ pc})$ correspondente com o tamanho do campo do NIFS e possui uma espessura de $h = 30 \text{ pc}$ (Hicks et al., 2009), sendo um valor típico para discos observados na região central de AGNs. Então, para o cálculo da densidade utilizamos a seguinte expressão:

$$N_{\text{H}_2} = \frac{M_{\text{H}_2}}{2m_{\text{p}}\pi r_{\text{d}}^2 h}. \quad (7.10)$$

O termo $2m_{\text{p}}$ expressa o resultado em unidades de moléculas por cm^3 . A massa de H_2 molecular foi calculada na seção 7.3, portanto, substituindo os valores aos seus respectivos parâmetros na Eq. 7.10, obtemos $N_{\text{H}_2} \approx 6.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, o que nos resulta numa taxa de *inflow* de $\approx 4.15 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Esse valor corresponde apenas a uma fração do gás molecular total que está escoando para o centro da galáxia e concorda com trabalhos anteriores para outras galáxias ativas (Riffel et al., 2008; Storchi-Bergmann et al., 2009).

A incerteza na taxa de *inflow* é grande devido, principalmente, à geometria assumida para seu cálculo.

7.4.2 Taxa de *outflow*

Para calcular a taxa de *outflow* na região central da galáxia, identificado como *blueshifts* e *redshifts* no mapa de resíduos do hidrogênio molecular (Figura 7.4) ao longo do eixo menor da galáxia e interna a $0.4''$, assumimos uma estrutura bicônica com um ângulo de abertura de 60° obtido diretamente da figura, que delimita o *outflow*, com um raio $r \approx 31.6 \text{ pc}$ e utilizamos a seguinte expressão matemática:

$$\dot{M}_{\text{out}} = \frac{2m_p N_{\text{H}_2} v \pi r^2 n}{\text{sen } \theta}, \quad (7.11)$$

onde m_p é a massa do próton, N_{H_2} é a densidade do gás molecular obtida pela Eq. 7.10, v é a velocidade do gás ejetado, n vale 2 e corresponde ao número de lados do cone e θ é o ângulo que o eixo central do cone faz com o plano do céu. A velocidade foi obtida diretamente da Figura 7.4 e vale $v = 70 \text{ km s}^{-1}$. Rosario et al. (2010) estimaram $\theta = 18^\circ$, o qual adotamos no cálculo da taxa de *outflow*. Substituindo os parâmetros na Eq. 7.11, obtivemos $\dot{M}_{\text{out}} = 4.66 \times 10^{-4} M_\odot \text{ ano}^{-1}$. Esse valor é menor do que as taxas de *outflows* encontradas para o gás ionizado mostradas na Tabela 7.1. Isso é esperado uma vez que o H_2 se encontra mais retido no plano das galáxias, enquanto que o gás ionizado se estende a altas latitudes, onde os *outflows* são mais comumente observados.

Tabela 7.1: Massas de gás, taxas de *inflow* em H_2 morno e taxas de *outflow* do gás ionizado, utilizando espectroscopia de IFU no IV.

Galáxia	Massa de H_2 (M_\odot)	Massa de H II (M_\odot)	Taxa de <i>inflow</i> ($M_\odot \text{ ano}^{-1}$)	Taxa de <i>outflow</i> ($M_\odot \text{ ano}^{-1}$)	Referência
Mrk 1066	3.3×10^3	1.7×10^7	-	6×10^{-2}	[1]
NGC 4151	2.4×10^2	2.4×10^6	4×10^{-5}	2	[2]
NGC 7582	6.2×10^2	3×10^6	-	5×10^{-2}	[3]
Mrk 1157	-	-	-	6	[4]
Mrk 79	3×10^3	6×10^6	4×10^{-3}	3.5	[5]
Mrk 766	1.2×10^3	7×10^6	-	2.2	[6]
NGC 1068	29	2.2×10^4	15^\ddagger	-	[7]
NGC 4051	66	1.4×10^6	4×10^{-5}	-	[8]
NGC 1097	-	-	1.2^\ddagger	-	[9]
NGC 2110	1.4×10^3	1.7×10^6	4.15×10^{-4}	$4.66 \times 10^{-4}\ddagger$	[10]

[1] Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010), Riffel e Storchi-Bergmann (2011a), [2] Storchi-Bergmann et al. (2009, 2010), [3] Riffel et al. (2009), [4] Riffel e Storchi-Bergmann (2011c), [5] Riffel, Storchi-Bergmann e Winge (2013), [6] Schönell et al. (2013), [7] Müller-Sánchez et al. (2009), Riffel et al. (2013, em preparação), [8] Riffel et al. (2008), [9] Davies et al. (2009), [10] Resultados obtidos neste trabalho. ‡ Taxa de *inflow* total (gás frio + gás morno). ‡ Para o gás molecular.

7.4.3 Taxa de acreção

A matéria acretada pelo BNS necessária para produzir a luminosidade nuclear da galáxia é chamada de taxa de acreção e pode ser expressa matematicamente como:

$$\dot{m} = \frac{L_{\text{bol}}}{c^2 \eta}, \quad (7.12)$$

onde c é a velocidade da luz, η corresponde à eficiência da conversão de matéria em energia (para galáxias Seyfert, usualmente, temos $\eta = 0.1$ (Frank; King; Raine, 2002)) e L_{bol} corresponde à luminosidade bolométrica. Como a luminosidade a partir de raios-X para a NGC 2110 foi estimada em $L_X = 2.9 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ (Pellegrini, 2010), podemos usar a relação $L_{\text{bol}} = 10L_X$ para obter a luminosidade e finalmente a taxa de acreção, que foi estimada em $\dot{m} = 5.1 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$.

A taxa de acreção é aproximadamente uma ordem de grandeza maior que a taxa de *inflow* e *outflow*, as quais são da mesma ordem de grandeza, indicando que são necessários mais escoamentos de gás em direção ao centro para alimentar o BNS. Esse escoamento de gás, provavelmente, se dá em gás molecular frio que é muito mais abundante que o gás molecular morno que emite em IV.

Capítulo 8

Considerações finais

8.1 Conclusões

A partir de observações no IV próximo com o instrumento NIFS do Telescópio Gemini estudamos a cinemática das estrelas para a região central das galáxias Seyfert 2 NGC 1068 e NGC 2110, e a distribuição de fluxos e cinemática do gás emissor das principais linhas espectrais da banda K para NGC 2110, com resoluções espaciais de ≈ 8 pc para NGC 1068 e ≈ 24 pc para NGC 2110. Nossas principais conclusões foram:

- O campo de velocidades das estrelas apresenta um padrão de rotação típico para as duas galáxias. Os dois objetos possuem um campo de velocidades bem representado por um modelo cinemático com órbitas estelares descritas por um potencial de Plummer. Para NGC 1068, o modelo cinemático resultou numa massa para o bojo da galáxia de $\approx 4 \times 10^8 M_{\odot}$, velocidade sistêmica de $\approx 1145 \text{ km s}^{-1}$ e ângulo de posição da linha dos nodos de $\approx 98^{\circ}$. Para NGC 2110 obtivemos os seguintes valores através do modelo cinemático: massa do bojo de $\approx 3 \times 10^9 M_{\odot}$, velocidade sistêmica de $\approx 2334 \text{ km s}^{-1}$, inclinação do disco de $\approx 45^{\circ}$ e orientação das linhas dos nodos de $\approx 161^{\circ}$.
- A massa do BNS de NGC 1068 foi calculada com a relação $M_{\bullet} - \sigma_{\star}$ e pelo Teorema do Virial, os valores obtidos são $M_{\bullet} = 4.3_{-3}^{+6} \times 10^7 M_{\odot}$ e $M_{\bullet} \approx 3.16 \times 10^7 M_{\odot}$, respectivamente. Para NGC 2110, a partir da relação $M_{\bullet} - \sigma_{\star}$, estimamos a massa do BNS como sendo $M_{\bullet} = 1.3_{-0.7}^{+2.5} \times 10^8 M_{\odot}$.
- Observamos uma queda no valor da dispersão estelar próxima ao núcleo de NGC 1068. Esse $\sigma_{\star} - \text{drop}$ está associado com um disco nuclear frio que está colaborando para a formação de estrelas nessa região.

- Em NGC 2110, observamos que as distribuições de fluxos das linhas de emissão do H_2 e Bry apresentam morfologias distintas. Enquanto que a distribuição do hidrogênio molecular cobre todo o campo de observação, o hidrogênio ionizado apresenta uma estrutura mais estendida do sudeste ao noroeste.
- A emissão do H_2 é devida a processos térmicos com temperatura de excitação de $\approx 2100 - 2700$ K. Essa conclusão foi obtida a partir dos valores observados para os fluxos e razões entre intensidades de linhas de emissão.
- As massas do gás molecular e do gás ionizado foram estimadas em $M_{H_2} \approx 1.4 \times 10^3 M_\odot$ e $M_{HII} \approx 1.7 \times 10^6 M_\odot$ para a região central de NGC 2110, interna a $450 \times 450 pc^2$.
- Os campos de velocidades do gás apresentam um padrão de rotação semelhante ao observado para as estrelas em NGC 2110. Entretanto, desvios desse padrão são observados, os quais são consistentes com escoamentos de gás em direção ao núcleo ao longo de braços espirais e ejeções de matéria com uma morfologia bicônica.
- As taxas de *outflow* e *inflow* valem, respectivamente, $4.66 \times 10^{-4} M_\odot \text{ano}^{-1}$ e $4.15 \times 10^{-4} M_\odot \text{ano}^{-1}$ e são uma ordem de grandeza menor do que a taxa de acreção.

8.2 Perspectivas

Como proposta de trabalho futuro, pretendemos ampliar a amostra de galáxias observadas com o objetivo de obter um cenário mais claro em relação aos processos físicos em AGNs, quantificando a relação entre o *feeding* e *feedback*.

Para a galáxia NGC 2110 verificaremos regiões onde o perfil da linha de emissão do H_2 possui duas componentes, as quais serão ajustadas por duas curvas gaussianas a fim de melhor entender a física relacionada a emissão do H_2 .

Referências Bibliográficas

- Antonucci, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. **Annual review of astronomy and astrophysics**, v. 31, p. 473–521, 1993.
- Antonucci, R. R. J.; Miller, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 297, p. 621–632, out. 1985.
- Axon, D. J.; Marconi, A.; Capetti, A.; Maccetto, F. D.; Schreier, E.; Robinson, A. Jet-Driven Motion in the Narrow-Line Region of NGC 1068. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 496, p. L75, abr. 1998.
- Barbosa, F. K. B.; Storchi-Bergmann, T.; Cid Fernandes, R.; Winge, C.; Schmitt, H. Gemini/GMOS Integral Field Unit stellar kinematics of the nuclear region of six nearby active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 371, p. 170–184, set. 2006.
- Black, J. H.; van Dishoeck, E. F. Fluorescent excitation of interstellar H₂. **The Astrophysical Journal**, v. 322, p. 412–449, nov. 1987.
- Bower, R. G.; Benson, A. J.; Malbon, R.; Helly, J. C.; Frenk, C. S.; Baugh, C. M.; Cole, S.; Lacey, C. G. Breaking the hierarchy of galaxy formation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 370, p. 645–655, ago. 2006.
- Capetti, A.; Axon, D. J.; Macchetto, F.; Sparks, W. B.; Boksenberg, A. Radio Outflows and the Origin of the Narrow-Line Region in Seyfert Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 469, p. 554, out. 1996.
- 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.
- Cid Fernandes, R.; Heckman, T.; Schmitt, H.; González Delgado, R. M.; Storchi-Bergmann, T. Empirical Diagnostics of the Starburst-AGN Connection. **The Astrophysical Journal**, v. 558, p. 81–108, set. 2001.

- 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.
- Davies, R. I.; Maciejewski, W.; Hicks, E. K. S.; Tacconi, L. J.; Genzel, R.; Engel, H. Stellar and Molecular Gas Kinematics Of NGC 1097: Inflow Driven by a Nuclear Spiral. **The Astrophysical Journal**, v. 702, p. 114–128, set. 2009.
- Davies, R. I.; Müller Sánchez, F.; Genzel, R.; Tacconi, L. J.; Hicks, E. K. S.; Friedrich, S.; Sternberg, A. A Close Look at Star Formation around Active Galactic Nuclei. **The Astrophysical Journal**, v. 671, p. 1388–1412, dez. 2007.
- Di Matteo, T.; Springel, V.; Hernquist, L. Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. **Nature**, v. 433, p. 604–607, fev. 2005.
- Diniz, R. M. **Uma Biblioteca de Espectros Estelares para Medidas de Cinemática Estelar em Galáxias**. 2010. Dissertação (Graduação) — Curso de Física Bacharelado, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2010.
- Emsellem, E.; Fathi, K.; Wozniak, H.; Ferruit, P.; Mundell, C. G.; Schinnerer, E. Gas and stellar dynamics in NGC 1068: probing the galactic gravitational potential. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 365, p. 367–384, jan. 2006.
- Emsellem, E.; Greusard, D.; Combes, F.; Friedli, D.; Leon, S.; Pécontal, E.; Wozniak, H. Dynamics of embedded bars and the connection with AGN. I. ISAAC/VLT stellar kinematics. **Astronomy and Astrophysics**, v. 368, p. 52–63, mar. 2001.
- Falcke, H.; Wilson, A. S.; Simpson, C. HST and VLA Observations of Seyfert 2 Galaxies: The Relationship between Radio Ejecta and the Narrow-Line Region. **The Astrophysical Journal**, v. 502, p. 199, jul. 1998.
- Falcke, H.; Wilson, A. S.; Simpson, C.; Bower, G. A. Helical Strands in the Jetlike Narrow-Line Region of ESO 428-G14. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 470, p. L31, out. 1996.
- Fathi, K.; Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R. A.; Winge, C.; Axon, D. J.; Robinson, A.; Capetti, A.; Marconi, A. Streaming Motions toward the Supermassive Black Hole in NGC 1097. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 641, p. L25–L28, abr. 2006.
- Ferrarese, L.; Ford, H. Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei: Past, Present and Future Research. **Space Science Reviews**, v. 116, p. 523–624, fev. 2005.

- Ferrarese, L.; Merritt, D. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 539, p. L9–L12, ago. 2000.
- Ferruit, P.; Mundell, C. G.; Nagar, N. M.; Emsellem, E.; Pécontal, E.; Wilson, A. S.; Schinnerer, E. Ionized gas and stars in the central kiloparsec of the type 2 Seyfert galaxy NGC 2110 - I. The data. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 352, p. 1180–1198, ago. 2004.
- Ferruit, P.; Wilson, A. S.; Whittle, M.; Simpson, C.; Mulchaey, J. S.; Ferland, G. J. Hubble Space Telescope/Faint Object Spectrograph Spectroscopy of Spatially Resolved Narrow-Line Regions in the Seyfert 2 Galaxies NGC 2110 and NGC 5929. **The Astrophysical Journal**, v. 523, p. 147–162, set. 1999.
- Frank, J.; King, A.; Raine, D. J. *Accretion Power in Astrophysics: Third Edition*. jan. 2002.
- Garcia-Lorenzo, B.; Mediavilla, E.; Arribas, S.; del Burgo, C. Evidence of Two Kinematically Different Stellar Systems in NGC 1068. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 483, p. L99, jul. 1997.
- Gebhardt, K.; Bender, R.; Bower, G.; Dressler, A.; Faber, S. M.; Filippenko, A. V.; Green, R.; Grillmair, C.; Ho, L. C.; Kormendy, J.; Lauer, T. R.; Magorrian, J.; Pinkney, J.; Richstone, D.; Tremaine, S. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 539, p. L13–L16, ago. 2000.
- Gebhardt, K.; Richstone, D.; Tremaine, S.; Lauer, T. R.; Bender, R.; Bower, G.; Dressler, A.; Faber, S. M.; Filippenko, A. V.; Green, R.; Grillmair, C.; Ho, L. C.; Kormendy, J.; Magorrian, J.; Pinkney, J. Axisymmetric Dynamical Models of the Central Regions of Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 583, p. 92–115, jan. 2003.
- Gerhard, O. E. Line-of-sight velocity profiles in spherical galaxies: breaking the degeneracy between anisotropy and mass. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 265, p. 213, nov. 1993.
- Gerssen, J.; Allington-Smith, J.; Miller, B. W.; Turner, J. E. H.; Walker, A. GMOS IFU observations of the stellar and gaseous kinematics in the centre of NGC 1068. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 365, p. 29–36, jan. 2006.
- González Delgado, R. M.; Arribas, S.; Pérez, E.; Heckman, T. Is a Minor Merger Driving the Nuclear Activity in the Seyfert 2 Galaxy NGC 2110? **The Astrophysical Journal**, v. 579, p. 188–204, nov. 2002.

- Graham, A. W.; Onken, C. A.; Athanassoula, E.; Combes, F. An expanded M_{bh} - σ diagram, and a new calibration of active galactic nuclei masses. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 412, p. 2211–2228, abr. 2011.
- Hicks, E. K. S.; Davies, R. I.; Malkan, M. A.; Genzel, R.; Tacconi, L. J.; Müller Sánchez, F.; Sternberg, A. The Role of Molecular Gas in Obscuring Seyfert Active Galactic Nuclei. **The Astrophysical Journal**, v. 696, p. 448–470, maio 2009.
- Hollenbach, D.; McKee, C. F. Molecule formation and infrared emission in fast interstellar shocks. III - Results for J shocks in molecular clouds. **The Astrophysical Journal**, v. 342, p. 306–336, jul. 1989.
- Komossa, S. Narrow-line Seyfert 1 Galaxies. In: **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2008. (Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, v. 32), p. 86–92.
- Lodato, G.; Bertin, G. Non-Keplerian rotation in the nucleus of NGC 1068: Evidence for a massive accretion disk? **Astronomy and Astrophysics**, v. 398, p. 517–524, fev. 2003.
- Macchetto, F.; Capetti, A.; Sparks, W. B.; Axon, D. J.; Boksenberg, A. HST/FOC imaging of the narrow-line region of NGC 1068. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 435, p. L15–L18, nov. 1994.
- Maloney, P. R.; Hollenbach, D. J.; Tielens, A. G. G. M. X-Ray-irradiated Molecular Gas. I. Physical Processes and General Results. **The Astrophysical Journal**, v. 466, p. 561, jul. 1996.
- Márquez, I.; Masegosa, J.; Durret, F.; González Delgado, R. M.; Moles, M.; Maza, J.; Pérez, E.; Roth, M. The detection of stellar velocity dispersion drops in the central regions of five isolated Seyfert spirals. **Astronomy and Astrophysics**, v. 409, p. 459–467, out. 2003.
- Martins, L. P.; Riffel, R.; Rodríguez-Ardila, A.; Gruenwald, R.; de Souza, R. Nuclear and extended spectra of NGC 1068 - II. Near-infrared stellar population synthesis. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 406, p. 2185–2192, ago. 2010.
- Mazzalay, X.; Saglia, R. P.; Erwin, P.; Fabricius, M. H.; Rusli, S. P.; Thomas, J.; Bender, R.; Opitsch, M.; Nowak, N.; Williams, M. J. Molecular gas in the centre of nearby galaxies from VLT/SINFONI integral field spectroscopy - I. Morphology and mass inventory. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, p. 217, nov. 2012.
- Miller, J. S.; Goodrich, R. W. Spectropolarimetry of high-polarization Seyfert 2 galaxies and unified Seyfert theories. **The Astrophysical Journal**, v. 355, p. 456–467, jun. 1990.

- Moran, E. C.; Barth, A. J.; Eracleous, M.; Kay, L. E. Transient and Highly Polarized Double-Peaked H α Emission in the Seyfert 2 Nucleus of NGC 2110. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 668, p. L31–L34, out. 2007.
- 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.; Davies, R. I.; Genzel, R.; Tacconi, L. J.; Eisenhauer, F.; Hicks, F.; Friedrich, E. K. S.; Sternberg, A. Molecular Gas Streamers Feeding and Obscuring the Active Nucleus of NGC 1068. **The Astrophysical Journal**, v. 691, p. 749–759, jan. 2009.
- Müller-Sánchez, F.; Prieto, M. A.; Hicks, E. K. S.; Vives-Arias, H.; Davies, R. I.; Malkan, M.; Tacconi, L. J.; Genzel, R. Outflows from Active Galactic Nuclei: Kinematics of the Narrow-line and Coronal-line Regions in Seyfert Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 739, p. 69, out. 2011.
- Oliva, E.; Origlia, L.; Kotilainen, J. K.; Moorwood, A. F. M. Red supergiants as starburst tracers in galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v. 301, p. 55, set. 1995.
- Osterbrock, D. E.; Ferland, G. J. **Book-Review - Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei**. 2. ed. CA: University Science Books, 2006.
- Pellegrini, S. The Nuclear X-ray Emission of Nearby Early-type Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 717, p. 640–652, jul. 2010.
- Peterson, M. B. Book Review: An introduction to active galactic nuclei / Cambridge U Press, 1997. **The Observatory**, v. 117, p. 314, out. 1997.
- Reunanen, J.; Kotilainen, J. K.; Prieto, M. A. Near-infrared spectroscopy of nearby Seyfert galaxies - I. First results. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 331, p. 154–168, mar. 2002.
- Riffel, R.; Ruschel-Dutra, D.; Pastoriza, M. G.; Rodríguez-Ardila, A.; Santos JR., J. F. C.; Bonatto, C. J.; Ducati, J. R. Near-infrared integrated spectra of Galactic globular clusters: testing simple stellar population models. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 410, p. 2714–2724, fev. 2011.
- 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.; Storchi-Bergmann, T. Compact molecular disc and ionized gas outflows within 350 pc of the active nucleus of Mrk 1066. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 411, p. 469–486, fev. 2011.
- _____. Compact molecular disc and ionized gas outflows within 350 pc of the active nucleus of Mrk 1066. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 411, p. 469–486, fev. 2011.
- _____. Feeding and feedback in the active nucleus of Mrk 1157 probed with the Gemini Near-Infrared Integral-Field Spectrograph. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 417, p. 2752–2769, nov. 2011.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Dors, O. L.; Winge, C. AGN-starburst connection in NGC7582: Gemini near-infrared spectrograph integral field unit observations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 393, p. 783–797, mar. 2009.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Nagar, N. M. Near-infrared dust and line emission from the central region of Mrk1066: constraints from Gemini NIFS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 404, p. 166–179, maio 2010.
- 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.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Winge, C.; Barbosa, F. K. B. 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.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Winge, C.; McGregor, P. J.; Beck, T.; Schmitt, H. Mapping of molecular gas inflow towards the Seyfert nucleus of NGC4051 using Gemini NIFS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 385, p. 1129–1142, abr. 2008.
- Rodríguez-Ardila, A.; Pastoriza, M. G.; Viegas, S.; Sigut, T. A. A.; Pradhan, A. K. Molecular hydrogen and [Fe II] in Active Galactic Nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v. 425, p. 457–474, out. 2004.
- 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.
- Rosario, D. J.; Whittle, M.; Nelson, C. H.; Wilson, A. S. The nuclear outflow in NGC 2110. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 408, p. 565–579, out. 2010.

- Schmitt, H. R.; Storchi-Bergmann, T.; Cid Fernandes, R. Spectral synthesis of the nuclear regions of Seyfert 2 and radio galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 303, p. 173–178, fev. 1999.
- Schnorr Müller, A.; Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R. A.; Ferrari, F.; Steiner, J. E.; Axon, D. J.; Robinson, A. Gas streaming motions towards the nucleus of M81. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 413, p. 149–161, maio 2011.
- Schönell, A. J. J.; Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Winge, C. Feeding Versus Feedback in AGNs from Near-Infrared IFU Observations: The Case of Mrk 766. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 415, p. 200–220, jan. 2013.
- Scoville, N. Z.; Hall, D. N. B.; Ridgway, S. T.; Kleinmann, S. G. Velocity, reddening, and temperature structure of the H₂ emission in Orion. **The Astrophysical Journal**, v. 253, p. 136–148, fev. 1982.
- Springel, V.; Di Matteo, T.; Hernquist, L. Black Holes in Galaxy Mergers: The Formation of Red Elliptical Galaxies. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 620, p. L79–L82, fev. 2005.
- Storchi-Bergmann, T.; Dors, O. L. J.; Riffel, R. A.; Fathi, K.; Axon, D. J.; Robinson, A.; Marconi, A.; Östlin, G. Nuclear Spirals as Feeding Channels to the Supermassive Black Hole: The Case of the Galaxy NGC 6951. **The Astrophysical Journal**, v. 670, p. 959–967, dez. 2007.
- Storchi-Bergmann, T.; González Delgado, R. M.; Schmitt, H. R.; Cid Fernandes, R.; Heckman, T. Circumnuclear Stellar Population, Morphology, and Environment of Seyfert 2 Galaxies: An Evolutionary Scenario. **The Astrophysical Journal**, v. 559, p. 147–156, set. 2001.
- Storchi-Bergmann, T.; Lopes, R. D. S.; McGregor, P. J.; Riffel, R. A.; Beck, T.; Martini, P. Feeding versus feedback in NGC4151 probed with Gemini NIFS - II. Kinematics. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 402, p. 819–835, fev. 2010.
- Storchi-Bergmann, T.; McGregor, P. J.; Riffel, R. A.; Simões Lopes, R.; Beck, T.; Dopita, M. 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.; Raimann, D.; Bica, E. L. D.; Fraquelli, H. A. The Frequency of Nuclear Star Formation in Seyfert 2 Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 544, p. 747–762, dez. 2000.
- Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R. A.; Riffel, R.; Diniz, M. R.; Borges Vale, T.; McGregor, P. J. Two-dimensional Mapping of Young Stars in the Inner 180 pc of NGC 1068: Correlation with Molecular Gas Ring and Stellar Kinematics. **The Astrophysical Journal**, v. 755, p. 87, ago. 2012.

- Storchi-Bergmann, T.; Winge, C.; Ward, M. J.; Wilson, A. S. Extended gas in Seyfert galaxies: near-infrared observations of NGC 2110 and Circinus. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 304, p. 35–46, mar. 1999.
- Tremaine, S.; Gebhardt, K.; Bender, R.; Bower, G.; Dressler, A.; Faber, S. M.; Filippenko, A. V.; Green, R.; Grillmair, C.; Ho, L. C.; Kormendy, J.; Lauer, T. R.; Magorrian, J.; Pinkney, J.; Richstone, D. The Slope of the Black Hole Mass versus Velocity Dispersion Correlation. **The Astrophysical Journal**, v. 574, p. 740–753, ago. 2002.
- Turner, J.; Kirby-Docken, K.; Dalgarno, A. The Quadrupole Vibration-Rotation Transition Probabilities of Molecular Hydrogen. **The Astrophysical Journal Supplement**, v. 35, p. 281, 1977.
- 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.
- van der Marel, R. P.; Franx, M. A new method for the identification of non-Gaussian line profiles in elliptical galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 407, p. 525–539, abr. 1993.
- Wilman, R. J.; Edge, A. C.; Johnstone, R. M. The nature of the molecular gas system in the core of NGC 1275. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 359, p. 755–764, maio 2005.
- Wilson, A. S.; Baldwin, J. A.; Ulvestad, J. S. Kinematics and ionization of extended ionized gas in active galaxies. I - The X-ray luminous galaxies NGC 2110, NGC 5506, and MCG -5-23-16. **The Astrophysical Journal**, v. 291, p. 627–654, abr. 1985.
- Wilson, A. S.; Braatz, J. A.; Heckman, T. M.; Krolik, J. H.; Miley, G. K. The Ionization Cones in the Seyfert Galaxy NGC 5728. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 419, p. L61, dez. 1993.
- Winge, C.; Axon, D. J.; Macchetto, F. D.; Capetti, A. The Narrow-Line Region of NGC 4151: A Turbulent Cauldron. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 487, p. L121, out. 1997.
- Winge, C.; Axon, D. J.; Macchetto, F. D.; Capetti, A.; Marconi, A. Hubble Space Telescope Faint Object Camera Spectroscopy of the Narrow-Line Region of NGC 4151. I. Gas Kinematics. **The Astrophysical Journal**, v. 519, p. 134–152, jul. 1999.
- 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 Journal Supplement**, v. 185, p. 186–197, nov. 2009.