

Dissertação de Mestrado

Cinemática e Distribuição do Gás Ionizado na Região Central das Galáxias Seyfert NGC 4501 e NGC 3982

Carine Brum

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
2015

Cinemática e Distribuição do Gás Ionizado na Região Central das Galáxias Seyfert NGC 4501 e NGC 3982

por

Carine Brum

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, 2015

©2015

Todos os direitos reservados a Carine Brum.

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)8103-2021

E-mail: carinefisica@gmail.com

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

Cinemática e Distribuição do Gás Ionizado na Região Central das Galáxias Seyfert NGC 4501 e NGC 3982

elaborado por
Carine Brum

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Prof. Dra. Ângela Cristina Krabbe

Prof. Dra. Eliade Ferreira Lima

Santa Maria, 25 de fevereiro de 2015.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e a todos que colaboraram, apoiaram, incentivaram e estiveram comigo durante a realização deste trabalho, em particular:

- ao professor Dr. Rogemar A. Riffel, pela orientação, incentivo e paciência, cuja paixão pela ciência é contagiante e a didática para com seus alunos é admirável, despertando-nos e motivando-nos em momentos desafiadores ou que esmorecemos um pouco;
- à Glória, pela compreensão, carinho, apoio, estímulo, companherismo, essenciais sempre;
- à meus pais, Cerilo e Vilma e irmãos Cléber e Jardel, pelo amor, apoio, carinho e credibilidade durante todos estes anos;
- à Luciana Grazioli, por todo o estímulo, força, incentivo, carinho, motivação, sendo uma grande amiga e um ponto de apoio e luz essenciais em minha vida, e a Maria, que é a grande responsável por ter chegado até aqui e concluído esta etapa com êxito;
- aos amigos e colegas de laboratório pelas inúmeras risadas e conversas descontraídas tornando o ambiente de trabalho mais agradável e harmonioso, ao Marlon por todas as vezes que me auxiliou quando ocorria algum problema nos programas que estava rodando, ao Alisson pelo mate sagrado no fim da tarde, que muitas vezes se estendeu noite a dentro de forma descontraída mas também produtiva;
- ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Resumo

Apresentamos mapas bidimensionais (2D) para fluxos e razões de linhas de emissão e para cinemática do gás da região central das galáxias Seyferts NGC 4501 e NGC 3982 a partir de espectros ópticos obtidos com a unidade de campo integral do instrumento GMOS (Gemini Multi Object Spectrograph) no telescópio Gemini Norte, com resolução espacial de ≈ 50 pc para NGC 4501 e ≈ 30 pc para NGC 3982. Estes mapas foram construídos a partir do ajuste de Gaussianas aos perfis das linhas de emissão de H α , [N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$, [S II] $\lambda\lambda 6716, 6730$ e [O I] $\lambda 6300$. Para NGC 4501, obtivemos ainda medidas da cinemática estelar a partir do ajuste da absorção do Na I $\lambda 5897$ Å por templates estelares. Tais medidas não foram possíveis para NGC 3982, pois não foram detectadas linhas de absorção com razão sinal ruído suficientemente alto. NGC 4501 apresenta emissão estendida até $5''$ do núcleo, com pico de fluxo observado na posição nuclear. NGC 3982 também apresenta pico de emissão no núcleo para todas as linhas, porém apresenta emissão em todo o campo observado ($7'' \times 15''$). Observa-se um anel de regiões H II a $5''$ do núcleo para esta galáxia. Os campos de velocidades do gás para ambas as galáxias apresentam um padrão de rotação, sendo bem representados por um modelo cinemático para um disco em rotação com órbitas circulares. O mapa de resíduos (velocidades observadas – modelo) mostra correlações com estruturas de poeira, que sugerem *inflows* de gás em direção ao núcleo das galáxias. A dispersão de velocidade estelar para o bojo de NGC 4501 é $\sigma_* = 150 \pm 30 \text{ km s}^{-1}$, que resulta em uma massa para o buraco negro supermassivo de $M_{BH} = 3_{-2}^{+5} \times 10^7 M_\odot$ utilizando a relação $M - \sigma$. Os mapas de dispersão de velocidades (σ) para NGC 4501 mostram valores de 50 a 150 km s^{-1} para linhas proibidas, enquanto que H α apresenta valores menores, com $\sigma < 100 \text{ km s}^{-1}$ em todo o campo. Os maiores valores de σ para todas as linhas de emissão são observados a $2-3''$ a nordeste do núcleo, sendo co-espacial com uma distorção vista no campo de velocidades. Em NGC 3982 observam-se valores de σ entre 50 a 150 km s^{-1} , com os maiores valores observados a $1''$ a leste do núcleo. Os mapas de densidades eletrônica obtidos da razão de linhas do [S II] $\lambda 6716/\lambda 6730$ mostram valores entre 100 cm^{-3} no núcleo e 900 cm^{-3} em um anel com raio de $1''$ ao redor do núcleo para NGC 4501 e valores entre 100 cm^{-3} e 3000 cm^{-3} para NGC 3982. Estes valores são comparáveis aos obtidos para outras galáxias ativas.

Palavras-chave: AGNs; Espectroscopia de campo integral; cinemática.

Abstract

We present two-dimensional (2D) maps for emission-line fluxes and ratios and kinematics for the central regions of the Seyfert galaxies NGC 4501 and NGC 3982, from optical spectra obtained with the GMOS (Gemini Multi Object Spectrograph) Integral Field Unit (IFU) at the Gemini North telescope at a spatial resolution of ≈ 50 pc for NGC 4501 and ≈ 30 pc for NGC 3982. These maps were constructed from fitting the emission-line profiles of $H\alpha$, $[N\ II]\ \lambda\lambda 6548, 6583$, $[S\ II]\ \lambda\lambda 6716, 6730$ and $[O\ I]\ \lambda 63000$ by Gaussian curves. For NGC 4501, we have also obtained measurements for the stellar kinematics by fitting the $Na\ I\ \lambda 5897\ \text{\AA}$ absorption by stellar templates, using the pPXF method. Such measurements were not possible for NGC 3982, due to the nondetection of absorption lines with signal-to-noise ratio high enough. NGC 4501 presents extended-line emission to up to $5''$ from the nucleus with flux peak seen at the nucleus. NGC 3982 also presents the emission peak at the nucleus for all lines, however it presents emission over the field of view ($7'' \times 15''$). A ring of H II regions is observed in the $H\alpha$ emission with a radius of $5''$ from the nucleus for this galaxy. The gas velocity fields for both galaxies present rotation pattern, being well represented by a kinematic model of rotating disk with circular orbits in the plane of the galaxy. The highest residuals (observed velocities – model) present correlations with dust structures, which can be interpreted as *inflows* towards the nucleus. The stellar velocity dispersion of the bulge of NGC 4501 is $\sigma_* = 150 \pm 30\ \text{km s}^{-1}$, resulting in a black hole mass of $M_{BH} = 3_{-2}^{+5} \times 10^7 M_\odot$ based on the $M - \sigma$ relationship. The velocity dispersion map for NGC 4501 shows values ranging from 50 to $150\ \text{km s}^{-1}$ for the forbidden lines, while the $H\alpha$ maps show overall smaller values, with $\sigma < 100\ \text{km s}^{-1}$ at all locations. The highest σ values for all emission lines are observed at $2\text{--}3''$ northeast from the nucleus for NGC 4501, being co-spatial with a distortion seen in the velocity field. In NGC 3982 observed σ values ranging 50 to $150\ \text{km s}^{-1}$, with the highest values observed at $1''$ east from the nucleus. The electron density maps obtained from the $[S\ II]\ \lambda 6716/\lambda 6730$ line ratio shows values between $100\ \text{cm}^{-3}$ the nucleus to $900\ \text{cm}^{-3}$ in a ring with radius $1''$ for NGC 4501 and values reaching $100\ \text{cm}^{-3}$ to $3000\ \text{cm}^{-3}$ for NGC 3982.

Keywords: AGNs; Integral Field Spectroscopy; kinematics.

Sumário

1	Introdução	7
1.1	Galáxias ativas	7
1.2	Modelo unificado	8
1.3	Galáxias Seyferts	9
1.4	Objetivos	11
1.4.1	Objetivo Geral	11
1.4.2	Objetivos específicos	12
2	As Galáxias NGC 4501 e NGC 3982 e Observações	14
2.1	NGC 4501	14
2.2	NGC 3982	16
2.3	Obtenção dos dados	18
2.4	O instrumento GMOS	18
2.5	Observações	19
2.6	Redução dos dados	20
2.6.1	<i>Subtração de bias</i>	20
2.6.2	<i>Divisão por flat-field</i>	20
2.6.3	<i>Twilight</i>	21
2.6.4	Calibração em comprimento de onda	22
2.6.5	Estrela padrão de fluxo	23
2.6.6	Construção do cubo de dados	23
3	Metodologia	25
3.1	Filtragem Espacial de Butterworth	25
3.2	Deconvolução de Richardson-Lucy	26

3.3	Cinemática estelar com a técnica pPXF	27
3.4	Ajustes das linhas de emissão	28
3.5	<i>Channel maps</i>	28
3.6	Densidade Eletrônica	28
3.7	Modelo de rotação	29
4	Resultados	31
4.1	Resultados: NGC 4501	31
4.2	Cinemática do Gás	32
4.3	<i>Channel maps</i>	34
4.4	Cinemática estelar	36
4.5	Resultados: NGC 3982	37
4.6	Cinemática do Gás	38
4.7	<i>Channel maps</i>	41
5	Discussões	50
5.1	Discussões: NGC4501	50
5.1.1	Cinemática do gás	50
5.1.2	Modelo cinemático	50
5.1.3	Excitação do Gás	52
5.1.4	Densidade Eletrônica	53
5.1.5	Cinemática estelar	54
5.1.6	Estimativa da massa do buraco negro supermassivo	55
5.2	Discussões: NGC 3982	55
5.2.1	Cinemática do gás	55
5.2.2	Modelo cinemático	56
5.2.3	Excitação do Gás	56
5.2.4	Densidade Eletrônica	59
6	Considerações finais	60
6.1	Conclusões	60
6.2	Perspectivas	61

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática do modelo unificado dos AGNs	9
1.2	Espectro nuclear da galáxia NGC 4151, classificada como Sy 1	10
1.3	Espectro nuclear da galáxia ngc 3982, classificada como Sy 2	11
1.4	Mapas de estruturas de galáxias ativas e não ativas	12
2.1	Galáxia NGC 4501	14
2.2	Galáxia NGC 3982	16
2.3	Mapa de cores combinando a imagem do NICMOS 1.6 μm com uma imagem WFPC2 - F606W. Contornos representam excessos de cores vermelhas e azuis comparados com o fundo da galáxia	17
2.4	Imagem bias obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.	21
2.5	Imagem <i>flat-field</i> obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.	22
2.6	Imagem <i>twilight</i> obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.	23
2.7	Imagem da lampada padrão (CuAr) obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.	24
3.1	Imagem de contínuo obtido do cubo de dados antes da filtragem (esquerda); imagem do contínuo após a filtragem espacial de Butterworth; resíduos correspondentes a diferença entre a imagem original e filtrada (direita)	26
3.2	Imagens de contínuo da galáxia convoluida (painel esquerdo) e deconvoluida (painel direito)	27
3.3	Ajustes de curvas Gaussianas para as linhas H α e [N II] $\lambda\lambda 6548,6583$	29
4.1	Espectro nuclear de NGC 4501 para uma abertura de 0.25'' x 0.25'' com as principais linhas de emissão identificadas.	32
4.2	Painel superior: imagem em grande escala de NGC 4501 obtida com o telescópio Kitt Peak de 0.9 m. Painel inferior esquerdo: mapa de estrutura da galáxia obtida com HST - WFPC2 usando o filtro F606W. Painel inferior direito: imagem de contínuo para o fluxo da linha de [N II]	33

4.3	Espectros da galáxia NGC 4501 obtidos com uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$ correspondente às posições das letras A até L	34
4.4	Espectros da galáxia NGC 4501 obtidos com uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$ correspondente às posições das letras M até T	35
4.5	Mapas de fluxos para as linhas de emissão $H\alpha$, [N II], [S II] e [O I]	36
4.6	Campos de velocidades para as linhas de emissão $H\alpha$, [N II], [S II] e [O I]	37
4.7	Mapas de σ para as linhas de emissão $H\alpha$, [N II], [S II] e [O I]	38
4.8	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do $H\alpha$	39
4.9	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do [N II] λ 6583 Å	39
4.10	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do [S II] λ 6716 Å	40
4.11	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do [O I] λ 6300 Å	40
4.12	Campos de velocidade estelar (esquerda) e mapa de dispersão de velocidade estelar (direita). As barras de cores mostram a escala em km s^{-1}	41
4.13	Espectro nuclear de NGC 3982 com as principais linhas de emissão identificadas.	42
4.14	Painel superior: imagem em grande escala de NGC 3982 obtida com o telescópio Hubble. Painel inferior esquerdo: mapa de estrutura da galáxia obtida com HST - WFPC2 usando o filtro F606W. Painel inferior direito: imagem de contínuo para o fluxo da linha de [N II]	43
4.15	Espectros da galáxia NGC 3982 obtidos com uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$ correspondente às posições das letras A até L.	44
4.16	Espectros da galáxia NGC 3982 obtidos com uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$, correspondentes às posições das letras de M até T	45
4.17	Mapas de fluxos para as linhas de emissão $H\alpha$, [N II], [S II] e [O I]	46
4.18	Campos de velocidades para as linhas de emissão $H\alpha$, [N II], [S II] e [O I].	47
4.19	Mapas de σ para as linhas de emissão $H\alpha$, [N II], [S II] e [O I]	47
4.20	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do $H\alpha$ λ 6562 Å	48
4.21	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do [N II] λ 6583 Å	48
4.22	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do [S II] λ 6716 Å	49
4.23	<i>Channel maps</i> ao longo do perfil da linha do [O I] λ 6300 Å	49
5.1	Modelo cinemático da galáxia NGC 4501	51
5.2	Mapas da velocidade da linha do [N II], de estrutura com filamentos de poeira sinalizados e resíduos	52
5.3	Mapa da razão entre as linhas de emissão de [N II]/ $H\alpha$	53
5.4	Diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2010)	54

5.5	Mapa de densidade eletrônica a partir da razão das linhas de enxofre	54
5.6	Modelo cinemático da galáxia NGC 3982	57
5.7	Mapas da velocidade do [N II], de estrutura com filamentos de poeira sinalizados e resíduos.	57
5.8	Mapa da razão entre as linhas de emissão de [N II]/H α	58
5.9	Diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2010)	58
5.10	Mapa de densidade eletrônica a partir da razão das linhas de enxofre	59

Lista de Tabelas

2.1	Detalhes das observações.	19
5.1	Parâmetros físicos de saída ajustados pelo modelo de rotação para NGC 4501	51
5.2	Parâmetros físicos de saída ajustados pelo modelo de rotação para NGC 3982	56

Capítulo 1

Introdução

1.1 Galáxias ativas

Galáxias com núcleo ativo (*Active Galactic Nuclei* - AGN) constituem um grupo de galáxias que diferem das chamadas galáxias “normais”, como a Via Láctea, por exemplo, pois estas apresentam uma fonte nuclear que emite grande quantidade de energia. O núcleo ativo tem tamanho pequeno ($< 1 \times 10^{-4} \text{pc}^1$) e alta luminosidade ($\geq 10^{11} L_{\odot}^2$) em relação a galáxia hospedeira (Peterson, 1997). Acredita-se que a origem dessa energia seja devido a presença de um buraco negro supermassivo (BNS) no centro dessas galáxias, com massa entre 10^6 e $10^{10} M_{\odot}^3$ (Mazzalay et al. (2013), Ferrarese e Ford (2005)). Núcleos ativos emitem radiação em todo ou quase todo o espectro eletromagnético e esta não pode ser atribuída unicamente à efeitos de natureza estelar, ou seja, proveniente de processos não térmicos (Peterson, 1997) e podem ser até 100 vezes mais brilhantes que sua galáxia hospedeira, mesmo apresentando um volume da ordem de $\sim 10^{30}$ vezes menor que a mesma.

Correlações entre propriedades do bojo das galáxias e a massa do BNS sugerem que todas as galáxias que formam bojos, formam também, em seus centros, um BNS com massa proporcional à massa do bojo (Ferrarese; Merritt, 2000; Gebhardt et al., 2000).

A maioria, se não todas as galáxias massivas tem em seu centro um BNS, o qual está, de alguma forma, atraindo matéria da vizinhança e convertendo-a em radiação. Em AGNs o BNS está acretando matéria da vizinhança e torna-se cada vez mais massivo (Ferrarese; Ford, 2005; Tremaine et al., 2002), enquanto que em galáxias normais não há acreção de matéria, possivelmente, porque não há matéria disponível na vizinhança do núcleo.

O estudo de AGNs têm o objetivo de tentar entender a importância das estruturas espirais de

¹ 1 parsec 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.

poeira atuando como um mecanismo que transporta o gás na galáxia hospedeira de grande escala ($\sim 1-10$ kpc) para o centros (<1 pc) para alimentar o AGN (Regan; Mulchaey, 1999), bem como, diferenciá-los de galáxias normais.

1.2 Modelo unificado

Os AGNs podem ser classificados em diferentes tipos dependendo das larguras das linhas de emissão, luminosidade, intensidade de radiação, emissão rádio e a orientação do AGN em relação à nossa linha de visada. Dessa forma, são divididos em QUASARS (*Quasi-stellar Radio Sources*), galáxias Seyfert, rádio-galáxias, LINERs (*Low Ionization Nuclear Emission-Line Region*) e BLAZARS. As classes mais luminosas dos AGNs são os QUASARS e as galáxias Seyfert. A diferença entre essas duas classes, deve-se à quantidade total de energia emitida pela fonte nuclear. No caso das Seyferts a energia total emitida pela fonte nuclear no visível é comparável à energia emitida por todas as estrelas da galáxia hospedeira. Já os QUASARS possuem fonte central 100 vezes mais brilhante que a galáxia hospedeira (Peterson, 1997).

Devido ao fato de os AGNs compartilharem muitas semelhanças entre si, sua emissão é originada basicamente pelos mesmos processos, levando ao surgimento de alguns modelos que reúnem essas semelhanças. A representação esquemática mais aceita atualmente foi o proposto originalmente por Osterbrock (1978) para diferenciar Sy 1 e Sy 2 e é conhecido como o Modelo Unificado de AGNs (Antonucci, 1993), (Urry; Padovani, 1995). Uma representação esquemática deste modelo é apresentada na figura 1.1. Consiste de um buraco negro supermassivo no centro alimentado pelo disco de acreção que o circunda, ao redor do qual encontra-se um toro denso de poeira, chamado de agente colimador, que é responsável pelo obscurecimento da região de formação de linhas largas (BLR - *Broad Line Region*), pois as mesmas são produzidas internamente ao toro.

Um jato de partículas relativísticas tem origem na região interna do disco de acreção. Em distâncias de até ~ 1 kpc do núcleo são produzidas as linhas estreitas, em uma região que em geral tem formato cônico, por ser colimada pelo toroide, chamada de região de formação de linhas estreitas (*NLR - Narrow Line Region*). As galáxias Seyfert 1 (Sy 1) e Seyfert 2 (Sy 2), no modelo unificado dos AGNs, representam os mesmos fenômenos vistos de diferentes ângulos em relação a linha de visada. Nas Sy 2 as linhas largas estão ocultas pelo toróide de poeira, já nas Sy 1 as linhas largas e estreitas são vistas. Esse modelo sugere que as diferentes classes de AGNs podem ser explicadas levando em consideração a orientação dos mesmos em relação a linha de visada e as diferenças intrínsecas das luminosidades nucleares. Duas ideias básicas fundamentam este modelo. Primeiro, todos os AGNs são essencialmente os mesmos e diferem principalmente na luminosidade central. Segundo, os AGNs apresentam um toro de poeira. Dessa forma a radiação observada dependerá da direção a partir da

qual o AGN é visualizado (Adams, 1977).

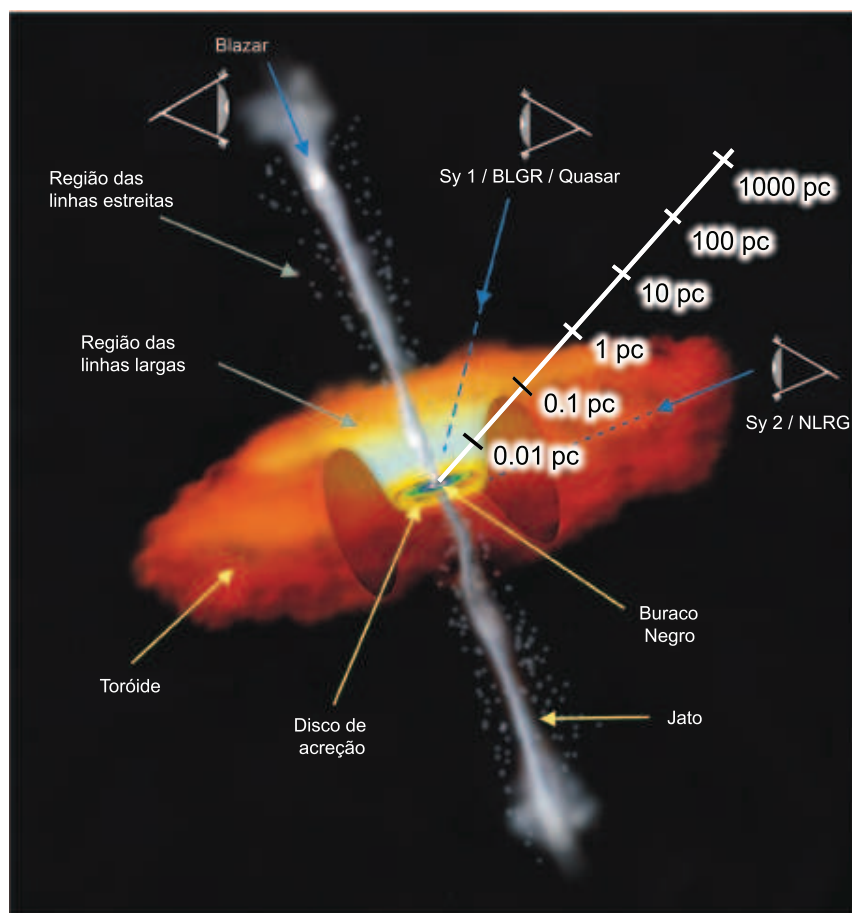


Figura 1.1: Representação esquemática do modelo unificado dos AGNs.

1.3 Galáxias Seyferts

Em 1943, Carl Seyfert veio a perceber que existiam várias galáxias semelhantes a NGC 1068 que formavam uma classe distinta. Selecionou um grupo de galáxias espirais que apresentavam núcleos brilhantes (NGC 1068, NGC 1275, NGC 3516, NGC 4051, NGC 4151 e NGC 7469) com características peculiares. Percebeu que essas galáxias se distinguíam de outras, ou seja, os núcleos destes objetos eram de alta luminosidade e suas linhas de emissão eram mais largas que as linhas de baixa excitação que apareciam no espectro do núcleo de diversas galáxias normais. O núcleo dessa classe de AGNs emite uma luminosidade considerada intermediária que varia entre $\sim 10^{42}$ a $\sim 10^{45}$ erg s^{-1} .

Os AGNs da classe Seyfert podem ser divididos em dois tipos, a partir de larguras de suas linhas de emissão: Sy 1 e Sy 2.

Sy 1 são caracterizadas por apresentarem duas componentes nas linhas de emissão permitidas, uma larga e outra estreita, devido a orientação da linha de visada, a qual permite que seja visto 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. O protótipo desta classe é a NCG 4151. O espectro de galáxias, como mostrado na figura 1.2, apresenta linhas permitidas largas, com larguras de FWHM (*Full Width at Half Maximum*) $\sim 1000 - 10000 \text{ km s}^{-1}$, como por exemplo linhas do H I, 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.

Na região de formação de linhas estreitas originam-se tanto de linhas permitidas quanto proibidas, como por exemplo, linhas do [O III], [S II], [N II] e [Fe II]. As linhas estreitas detectadas em Sy 1 apresentam larguras FWHM $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$ e a densidade eletrônica típica de $10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$. Na figura 1.2, mostramos um espectro para a galáxia Sy 1 NGC 4151 (Ho et al., 1995), onde observa-se a componente larga na linha de H.

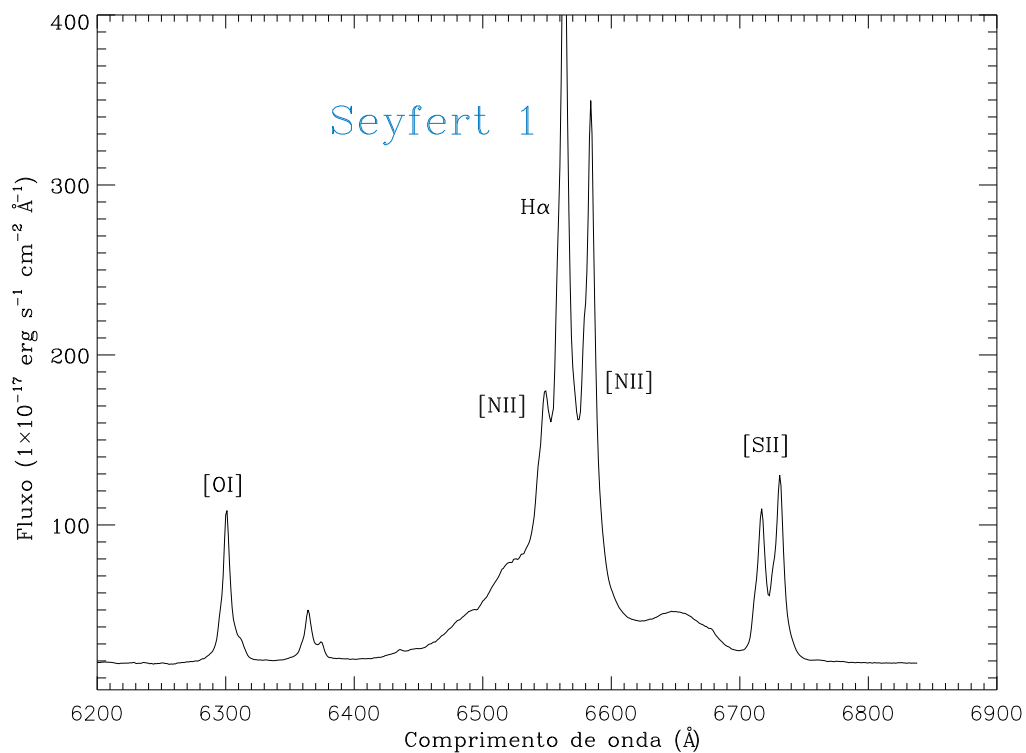


Figura 1.2: Espectro nuclear da galáxia NGC 4151, classificada como Sy 1.

Já nas Seyfert 2 são observadas somente linhas estreitas, pois a orientação da linha de visada é tal que não detectamos linhas largas. As linhas permitidas são aproximadamente da mesma largura das proibidas, com larguras semelhantes as observadas nas Sy 1 de $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$ (Osterbrock; Ferland,

2006). Na figura 1.3 apresentamos o espectro de uma galáxia classificada como Sy 2, (NGC 3982) onde observa-se que todas as linhas de emissão apresentam somente componente estreita.

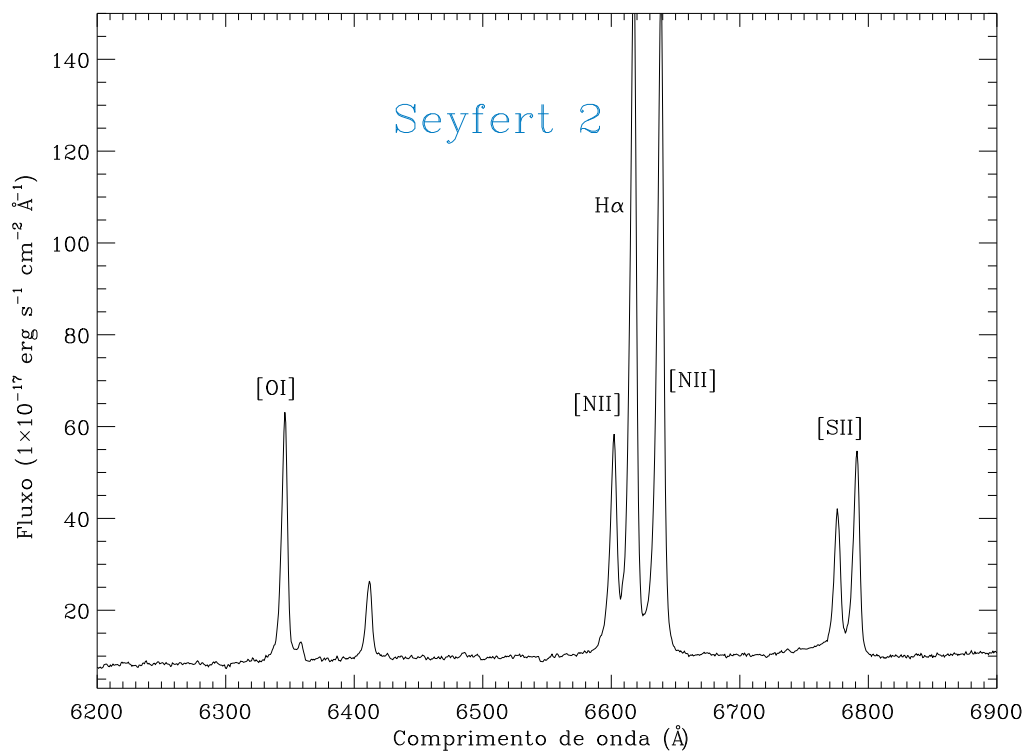


Figura 1.3: Espectro nuclear da galáxia ngc 3982, classificada como Sy 2.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O trabalho de Simões Lopes et al. (2007) mostrou uma forte correlação entre as estruturas de poeira circumnuclear e atividades em galáxias. As 34 galáxias *early-type* ativas observadas apresentam poeira circumnuclear, enquanto que, nas galáxias *early-type* não ativas, apenas 26% (9 das 34) apresentam poeira circumnuclear, o que sugere que a presença de poeira circumnuclear é uma condição necessária, porém não única, para que haja acreção de matéria no buraco negro central em galáxias *early-type*. A poeira em todas essas galáxias está tipicamente confinada aos kiloparsecs centrais e não é observado em grande escala. Essa estruturas de poeira podem ser vistas na figura 1.4 em AGNs nos painéis a esquerda, enquanto que nos painéis a direita (galáxias não tivas) essas estruturas não são vistas. Em galáxias *late-type*, porém, tanto ativas quanto não ativas há evidências de poeira circumnuclear, independente da presença de acreção nuclear, ou seja, todas as *late-type* apresentam poeira

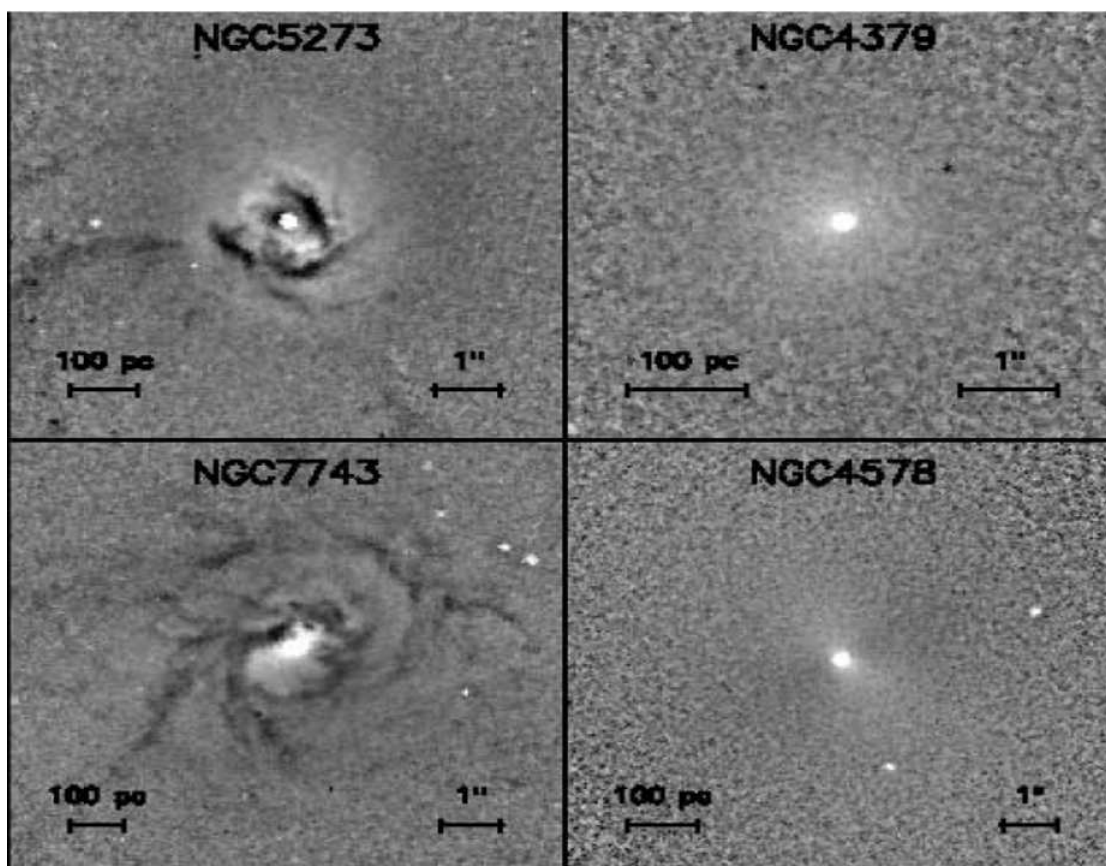


Figura 1.4: Mapas de estruturas de galáxias ativas e não ativas

independente de serem ou não AGNs. Estes estudos buscam entender a importância das estruturas espirais de poeira circumnuclear como agentes de transferência de matéria das partes externas (escalas de kpc) às partes internas das galáxias para alimentar o buraco negro supermassivo central. Motivados por trabalhos anteriores realizados por Fathi et al. (2006), Storchi-Bergmann et al. (2007), Schnorr Müller et al. (2011), (2014), (2014a) que estudaram estruturas espirais em AGNs e pelos resultados de Simões Lopes et al. (2007), temos como principal objetivo mapear em detalhes a emissão do gás na região central de galáxias ativas extraídas do trabalho de Simões Lopes et al. (2007), escolhidas por apresentarem estruturas de poeira nuclear e investigar possível escoamento de gás em direção ao centro.

1.4.2 Objetivos específicos

- Entender a importância das estruturas espirais de poeira atuando como um mecanismo que transporta o gás na galáxia hospedeira de grande escala ($\sim 1-10$ kpc) para o centros (<1 pc) para alimentar o AGN;
- Realizar um mapeamento bidimensional da distribuição, ionização e cinemática do gás na região

central das galáxias na região central das galáxias ativas NGC 4501 e NGC 3982 utilizando espectroscopia de campo integral na região óptica do espectro eletromagnético com os telescópios Gemini de 8m;

- Realizar um mapeamento da cinemática estelar a partir do ajuste de linhas de absorção presentes no espectro ótico;
- Analisar detalhes das redondezas do buraco negro supermassivo presente no centro dessas galáxias e propor um cenário físico para esta região.
- Estimar a massa do buraco negro supermassivo a partir da relação $M - \sigma$.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 encontram-se descrições a respeito dos objetos observados, galáxias NGC 4501 e NGC 3982, observações e etapas executadas para a redução dos dados. No capítulo 3 apresentamos a metodologia utilizada na realização deste trabalho. Nossos resultados, para ambas as galáxias, são mostrados no capítulo 4. As discussões são apresentadas no capítulo 5 e as conclusões e perspectivas no capítulo 6.

Capítulo 2

As Galáxias NGC 4501 e NGC 3982 e Observações

2.1 NGC 4501

A galáxia NGC 4501 faz parte do aglomerado de virgem e está a uma distância de 16.8 Mpc (Ho et al., 1997). De acordo com a classificação morfológica de Hubble, é uma galáxia espiral não barrada do tipo SA(rs)b (de Vaucouleurs et al., 1991). Na figura 2.1 apresenta-se uma imagem ótica em grande escala da galáxia NGC 4501 obtida do NOAO (*National Optical Astronomy Observatory*), na qual observa-se claramente seus braços espirais.

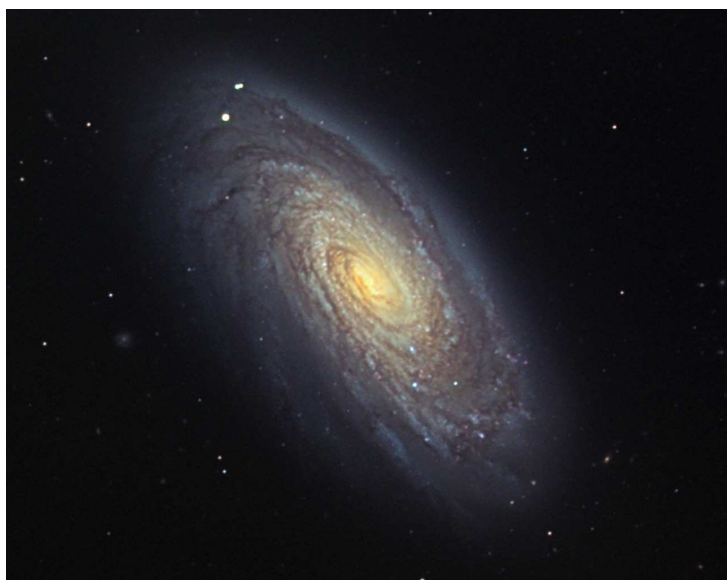


Figura 2.1: Imagem ótica da galáxia NGC 4501. Extraída de http://www.ccvallg.pt/astronomia/galaxias/galaxias_espirais/m88.jpg (16/06/12 - 19:35)

Utilizando dados de espectroscopia de fenda longa obtidos no telescópio de 6 m do *Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences*, Sil'chenko et al. (1999) realizaram

um estudo morfológico e cinemático de NGC 4501. Encontraram discos circumnucleares estelares e de gás, com raios de algumas centenas de parsec com ligeira rotação axissimétrica. O raio do disco interno nesta galáxia pode ser estimado numa variação de $4''$ a $7''$ devido a complexa distribuição de poeira na parte central.

Observações interferométricas de alta resolução espacial para a linha $^{12}\text{CO}(1-0)$ nos 5 kpc centrais da galáxia NGC 4501, foram analisadas por Onodera et al. (2004). Estes observaram que na região central a galáxia tem duas componentes de gás molecular - braços espirais penetrando na região nuclear e uma concentração central com raio de $5''$ (~ 390 pc). A massa total de gás estimada em $M_{\text{gás}} = 1.3 \times 10^8 M_{\odot}$, foi obtida a partir da medida do fluxo da linha. Os braços espirais são observados a partir da região nuclear até o fim do campo de visão ($r \sim 40''$). O campo de velocidades ao longo desses braços mostra desvios em relação ao movimento circular, isto é, apresenta movimentos não circulares superpostos numa rotação regular do disco, de cerca de 50 km s^{-1} ao longo do eixo menor da galáxia. O estudo da dinâmica do CO é compatível com a presença de escoamentos de gás em direção ao centro de NGC 4501 e conclui-se que choques de gás em braços espirais e/ou barras são mecanismos possíveis para transportar matéria em direção ao núcleo e alimentar o buraco negro (Onodera et al., 2004). Os resultados mostram braços espirais que se estendem para fora a partir do núcleo associados a espirais de poeira, juntamente com uma concentração de gás no centro. Embora NGC 4501 não mostre evidência de uma barra a concentração de gás molecular central é alta, o que é mais típico de galáxias barradas (Sakamoto et al., 1999). Baseado na análise de movimentos não circulares ao longo de braços espirais, Onodera et al. (2004) sugerem que esta concentração de gás molecular decorre do transporte de gás pelos braços espirais.

A distribuição de fluxos da linha de H_2 $2.12 \mu\text{m}$ observada com o instrumento SINFONI no telescópio VLT, mostra duas estruturas distintas: uma componente nuclear assimétrica rodeada por dois arcos que se assemelham a uma estrutura em forma de anel incompleto. Esses anéis incompletos de H_2 parecem estar localizados na parte interna das extremidades dos dois picos vistos em CO por Onodera et al. (2004), indicando um gradiente na temperatura do gás molecular no sentido de que o gás quente molecular (traçado pelo H_2 $2,12 \mu\text{m}$ de emissão) está localizado mais perto do núcleo do que o gás molecular frio (traçado pela emissão do CO). Uma comparação entre a distribuição de fluxos do H_2 e espirais de poeira vistas em uma imagem HST/WFPC2 F547, evidencia uma coincidência espacial entre o gás molecular H_2 e as faixas de poeira observadas, especialmente na região norte, onde tanto as estruturas vistas no gás molecular e de poeira são melhor definidas, o que sugere uma relação entre os dois meios até distâncias inferiores a $1''$ do núcleo (Mazzalay et al., 2013).

2.2 NGC 3982

A galáxia NGC 3982 caracteriza-se como uma galáxia espiral, apresenta uma barra e anel de formação estelar (SAB(r)b) (Ho et al., 1997). É o membro que apresenta maior brilho superficial do aglomerado de Virgem. Seu AGN classifica-se como Seyfert 2 e encontra-se a uma distância de 17 Mpc (Ho et al., 1997). Na figura 2.2 apresenta-se uma imagem ótica em grande escala da galáxia NGC 3982, na qual observa-se seus braços espirais.



Figura 2.2: Imagem ótica da galáxia NGC 3982. Extraída de <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2010-36-a-print.jpg> (14/04/14 - 19:55)

No estudo realizado por Kraemer et al. (2011) sobre a extinção e absorção na NLR de 40 galáxias Seyfert 2 e 26 Seyfert 1, NGC 3982 (a qual classificaram como Seyfert intermediária) apresenta uma clara discrepância das demais galáxias Seyferts analisadas, apresentando uma razão de $[OIII]/[OIV]=10.0$, enquanto que a média de $[OIII]\lambda 5007 \text{ \AA}/[OIV]\lambda 28.59\mu\text{m}$ para Seyferts intermediárias seria de 1.24, uma possível interpretação é que há um aumento para a linha $[OIII]\lambda 5007 \text{ \AA}$ devido a intensa formação estelar encontrada por Meléndez et al. (2008).

Estudo em múltiplos comprimentos de onda da natureza de galáxias Seyferts tipo 1.8/1.9, foi realizado por Trippe et al. (2010), no qual analisou-se uma amostra de 34 galáxias observadas pelo Sloan Digital Sky Survey (SDSS), no Cerro Tololo Inter - American Observatory (CTIO) obtendo espectros óticos, no European Photon Imaging Camera (EPIC) com detector XMM-Newton (daqui por diante XMM) obtendo espectros de raio-X e observações em infravermelho

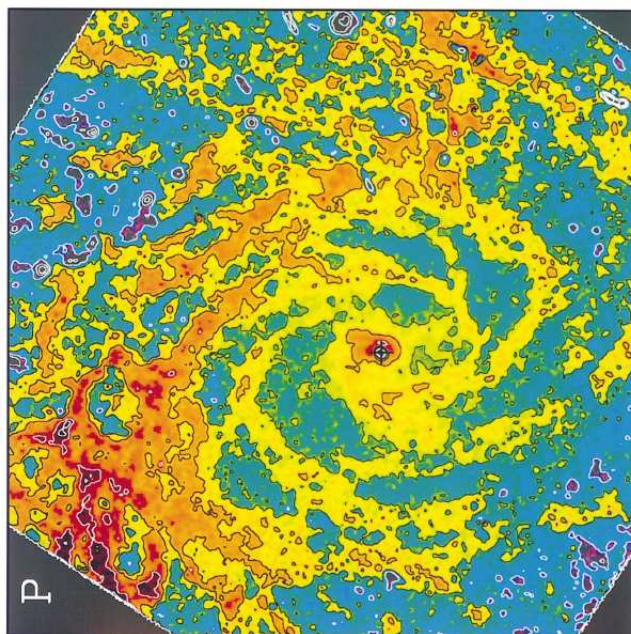


Figura 2.3: Combinação da imagem do NICMOS $1.6\mu\text{m}$ com uma imagem WFPC2 - F606W (extraído de Regan e Mulchaey (1999)).

médio com The Infrared Spectrograph (IRS) do Spitzer Space Telescope. Espectros do SDSS para a galáxia NGC 3982 não mostram traços de linha larga em $\text{H}\alpha$, evidenciando que este objeto é uma Sy 2, assim como, também é evidenciado pelo espectro do Spitzer. O modelo preliminar do espectro de XMM indica que o núcleo é fortemente atenuado com uma densidade de $N_H \sim 22.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$.

O Atlas de Imagens de Anéis Nucleares (AINUR) inclui 113 anéis encontrados em 107 galáxias, dentre as quais, a galáxia NGC 3982, que apresenta um anel interno, assim como publicado em de Vaucouleurs e Buta (1980). O anel nuclear consiste em áreas flocculentas de maior emissão $\text{H}\alpha$ e não muito bem definidas, com um raio de 64.8 pc.

A relação entre estruturas de poeiras na região central de galáxias ativas e a acreção de matéria em buracos negros supermassivos sugerida em Simões Lopes et al. (2007) foi evidenciada por Regan e Mulchaey (1999), quanto a análise de NGC 3982, a morfologia de extinção é claramente uma espiral padrão com mais extinção a norte do núcleo. O padrão em espiral parece ser multi-braços com a existência de dois a quatro braços espirais, dependendo de como são identificados. Um braço espiral pode ser traçado a 360° de arco aproximando-se para dentro (10 pc). Linhas azuis são visíveis a $\approx 8''$ a sudeste e a noroeste do núcleo do lado de fora das faixas de poeira. As faixas de poeira na imagem também parecem ser bastante suaves perto do núcleo comparado com a sua natureza mais agrupada na extremidade externa. O padrão espiral nuclear é contínuo e conecta-se aos braços espirais vistos em grande escala (figura 2.3)

NGC 3982 apresenta uma barra pequena com um raio de cerca de $10''$, visto em uma imagem

da banda I. Ainda mais para fora, o disco é dominado por um padrão espiral. O índice de cor $B - I$ exibe um padrão de múltiplos braços espirais ricos em poeira e formação estelar, mas é bastante suave próximo ao núcleo. Este padrão de múltiplos braços espirais é claro também em imagens de $H\alpha$, com várias regiões de formação estelar luminosas localizadas principalmente no braço sul. O núcleo desta galáxia é um emissor relativamente forte em $H\alpha$. Não sendo possível dizer quanto desta emissão é devido a estrelas ou ao AGN, mas o último é um provável contribuinte. O perfil de $H\alpha$ mostra um pico no núcleo, seguindo por uma queda e um pico secundário correspondente ao raio para a zona de formação estelar estão localizados nos braços espirais. O perfil cai rapidamente após um raio de $20'' - 25''$.

Martinsson et al. (2013a) apresentam um estudo da cinemática estelar e do gás ionizado (traçado pela emissão do [OIII]) para 30 galáxias “face-on”, dentre elas a NGC 3982, também nomeada UGC 6918 com dados obtidos com a IFU PPak instalada no telescópio Calar Alto de 3.5m localizado no sul da Espanha em um intervalo espectral de 4980 - 5379 Å e campo de visão de $64 \times 74''$. Através da posição do centro dinâmico, velocidades sistêmicas e orientações dos discos, a dependência radial para a velocidade de rotação e dispersão de velocidades do gás e das estrelas foi determinada. Intensidades altas de [O III] foram observadas no núcleo desta galáxia por Martinsson et al. (2013a), o que indica a atividade do buraco negro supermassivo. Em Martinsson et al. (2013b), analisando a amostra citada acima, encontraram que NGC 3982 é a galáxia com a maior razão entre a massa de gás molecular e massa estelar entre as galáxias da amostra, sendo a única galáxia com massa de gás molecular maior do que a massa em estrelas. Sua curva de rotação mostra um pico, que pode estar associado a presença de um disco empenado.

2.3 Obtenção dos dados

Os dados foram obtidos utilizando o telescópio Gemini-Norte de 8m, localizado no Vulcão adormecido Mauna Kea, a 4220 m de altitude no Havaí, com a unidade de campo integral do espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*).

2.4 O instrumento GMOS

Os dados de espectroscopia de campo integral de NGC 4501 e NGC 3982 foram obtidos com o espectrógrafo GMOS, que é o principal espectrógrafo ótico do Gemini, o qual permite que sejam feitas observações no intervalo espectral de 3600Å até 9400Å, nos modos fenda longa e multi fendas. Cada um desses instrumentos possui uma Unidade de Campo Integral (IFU), obtendo espectroscopia 3D e imageamento em um campo de 5.5 arcmin^2 .

O detector do GMOS consiste em três CCDs de 2048 x 4608 pixels dispostos em uma linha, com 0.5 mm de *gap* entre eles, o que resulta em um detector final de 6144 x 4608 pixels.

A IFU do GMOS fornece a capacidade de realizar espectroscopia de campos resolvidos espacialmente usando arranjos hexagonais de lentes contendo 1500 fibras, capazes de obter 1500 espectros simultâneos. Destes espectros, 1000 correspondem ao campo principal (de objetos de ciência) e 500 ao campo de céu, separados por 1 arcmin. É possível reconstruir uma imagem em comprimentos de ondas particulares, ou extrair um espectro de qualquer ponto do campo de visão.

A IFU GMOS pode operar em dois modos: o modo fenda dupla, que possui um campo de visão de $5'' \times 7''$ e o modo fenda única, que possui um campo de $5'' \times 3.5''$. A luz que chega aos dois arranjos de lentes é levada por fibras óticas até o espectrógrafo.

As fibras óticas e a metade do arranjo principal e do céu são alinhadas na entrada do sistema otimizado para o vermelho e a outra metade dos dois arranjos é alinhada na entrada do sistema otimizado para o azul. Há a possibilidade de bloquear um caminho ótico, permitindo que o espectrógrafo use somente a metade do arranjo. Assim a cobertura espacial será de $3.5'' \times 5''$ e $1.75'' \times 5''$ nos campos principal e de céu, respectivamente, e a cobertura espectral será maior. Quando as duas metades são usadas simultaneamente a cobertura espectral diminui pela metade para que os espectros extras “caibam” no detector e a cobertura espacial dobra, sendo então de $7'' \times 5''$ e $3.5'' \times 5''$ no campo principal e de céu, respectivamente.

2.5 Observações

As observações foram realizadas com o telescópio Gemini Norte para NGC 4501 e NGC 3982, utilizando o espectrógrafo IFU-GMOS operando no modo duas fendas cobrindo um intervalo espectral de 5600Å a 6900Å, que inclui várias linhas de emissão intensas em galáxias ativas. A rede utilizada foi R400 e filtro G5305. A tabela 2.1 apresenta algumas informações sobre as observações.

Tabela 2.1: Detalhes das observações.

Galáxia Observada	Data da Observação	Tempo de Exposição (s)	Número do Projeto
NGC 4501	14/11/2008	3×500	GN-2008A-Q-8
NGC 3982	01/01/2007	3×520	GN-2006B-Q-94

2.6 Redução dos dados

O processo de redução de dados foi realizado utilizando uma série de tarefas do pacote GMOS, desenvolvidas dentro do pacote GEMINI, ambos criados para rodar no programa de redução de dados astrofísicos IRAF (*Images Reduction And Analysis Facility*), distribuído pelo NOAO.

Quando se obtém imagens diretas do CCD, estes dados crus possuem defeitos/ruídos e precisam ser calibrados, por isso é necessário o processo de redução para que dados científicos possam ser extraídos dos mesmos. O primeiro passo é determinar o *trim* da imagem, seguido da subtração do *bias*. Após é necessário eliminar as diferenças de sensibilidades entre os pixels com o *flat-field* e *twilights*. As estrelas padrão são usadas para a calibração em fluxo. Os espectros da lâmpada de comparação (CuAr) são usados para calibração dos espectros em comprimentos de onda. As observações constituem-se em aquisições de *bias*, *flat-fields*, *twilights*, estrelas padrão e lâmpadas de comparação (CuAr) que serão usados para a redução, além de exposições para objetos de ciência, os quais serão descritos a seguir.

2.6.1 Subtração de bias

A corrente *bias* associa a cada pixel um valor de contagem independente do tempo de exposição e do objeto observado. Esse efeito é uma assinatura da eletrônica do instrumento e precisa ser subtraído para minimizar os efeitos de ruído de leitura do CCD. Em cada observação faz-se algumas exposições de tempo nulo, tira-se uma média dessas exposições e, em seguida, subtrai-se essa média da imagem original. Na figura 2.2 apresenta-se uma imagem típica para o *bias* obtido com o instrumento GMOS e usado na redução dos dados.

2.6.2 Divisão por flat-field

Cada pixel em um CCD responde de diferentes formas a mesma quantidade de radiação incidente e a diferentes comprimentos de onda de radiação, resultando em variações de ganho entre os pixels do detector. Para corrigir essa variação de sensibilidade pixel-a-pixel, bem como eliminar, em parte, efeitos de *vignetting* (menor iluminação de borda da imagem) divide-se a imagem do objeto de ciência por uma imagem de campo uniformemente iluminado (*flat-field*), que tem por função revelar as variações de ganho entre os pixels do CCD. A imagem *flat-field* pode ser obtida apontando-se o telescópio durante algum tempo para um tela iluminada por uma luz branca (imagem de *GCAL-flat* ou para o céu do crepúsculo (imagem de *twilight*). Para o caso de cubos de dados, a correção de *flat-field* consiste em calcular uma média de todos os espectros da imagem de *GCAL-flat*, ajustar um polinômio a esse espectro médio e dividir cada espectro pelo polinômio encontrado. Dessa forma, são obtidas as curvas de resposta, que indicam a variação

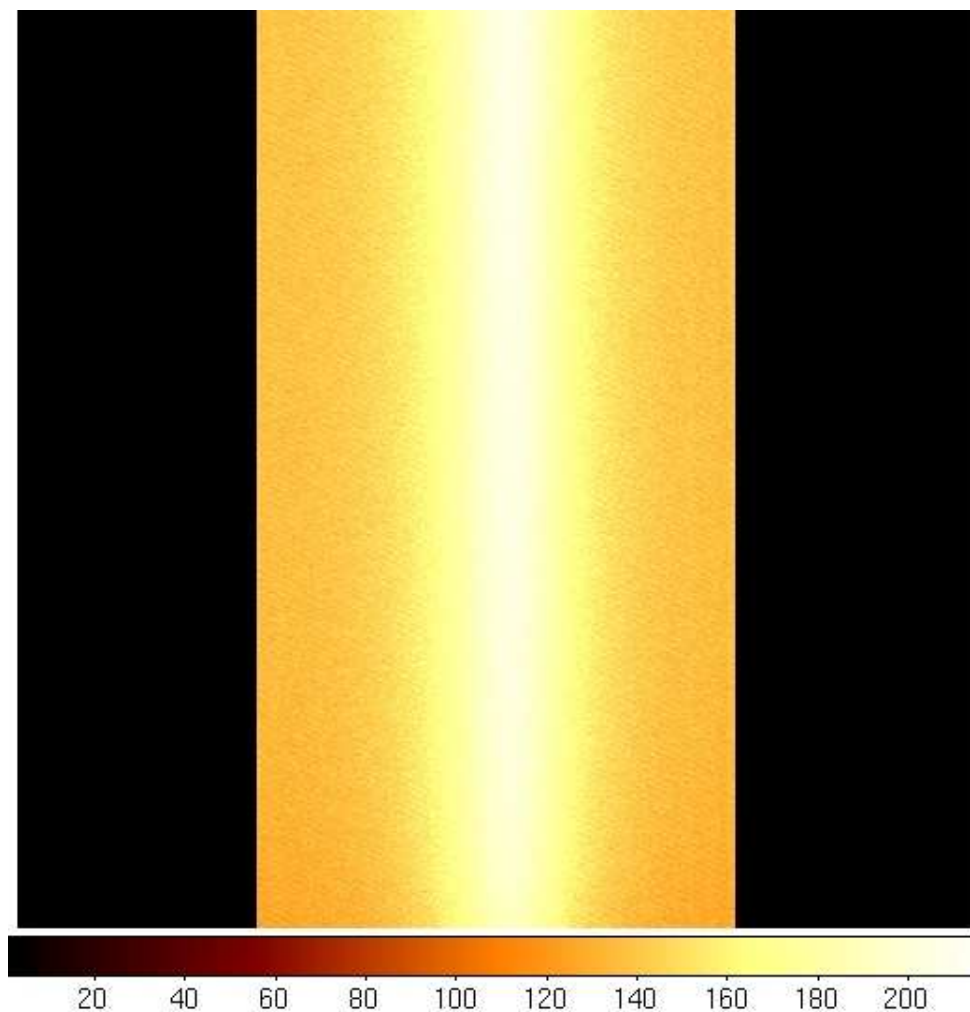


Figura 2.4: Imagem bias obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.

de ganho pixel a pixel espectral em cada um dos espectros. Na figura 2.3 apresenta-se uma imagem típica para o *flat-field* obtida com o instrumento GMOS e usado na redução dos dados.

2.6.3 *Twilight*

O GMOS possui dois caminhos óticos distintos (caminho azul e vermelho), e os transporte de radiação é feito por fibras óticas. Cada caminho ótico e cada fibra ótica possui uma resposta diferente para o transporte da radiação. As imagens *twilight* são usadas para corrigir a diferença de resposta fibra a fibra. Os espectros da imagem de *twilight* são divididos pelas curvas de resposta do *GCAL-flat*, em seguida calcula-se a média de cada um dos espectros da imagem de *twilight*, obtendo-se um mapa de resposta espacial com valores representativos da razão céu/lâmpada que indicam padrões de iluminação da lâmpada de *GCAL-flat* e também variações de ganho fibra a fibra. Multiplicando-se esse mapa de resposta do *twilight* pelas curvas de respostas corres-

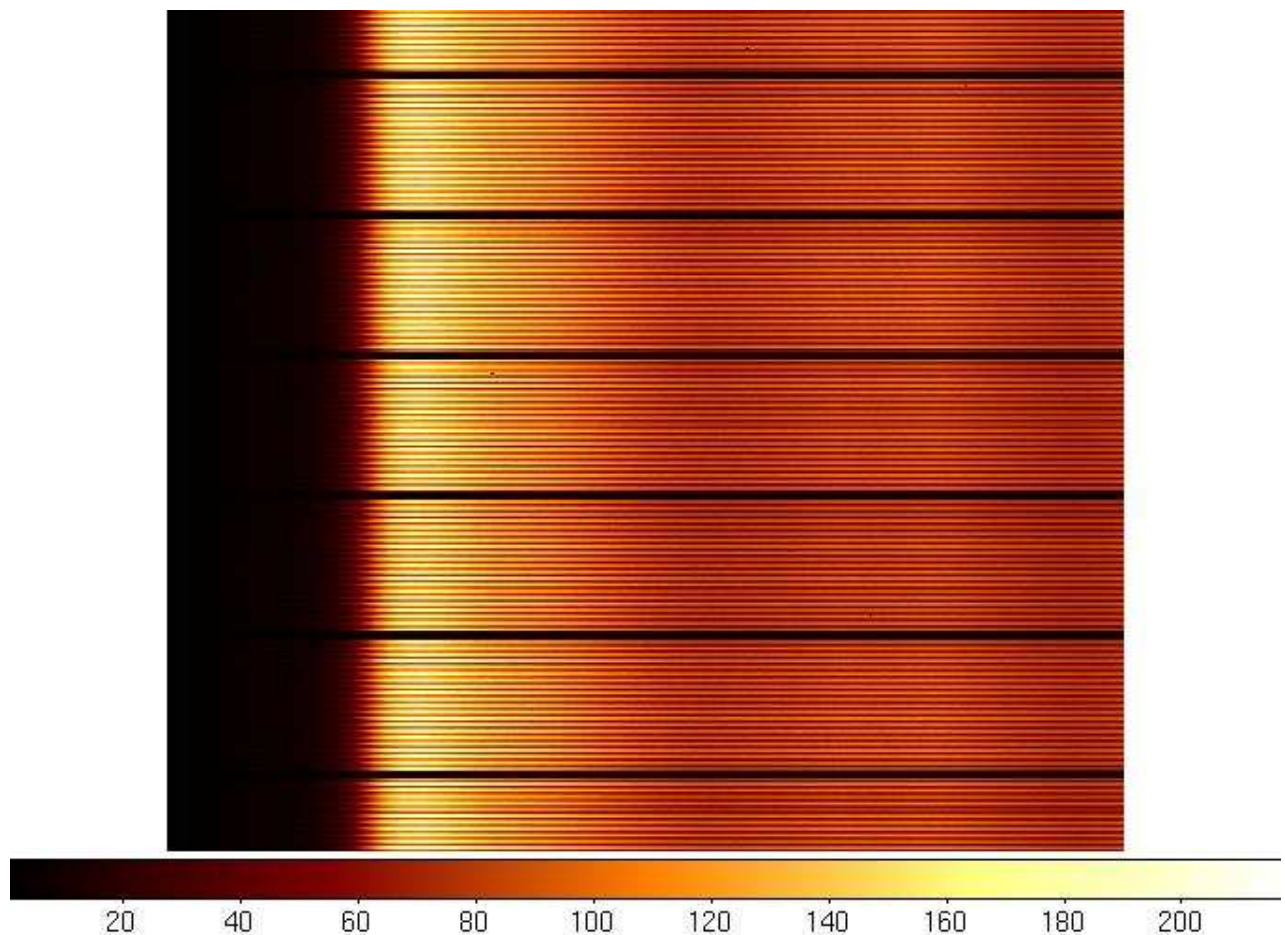


Figura 2.5: Imagem *flat-field* obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.

pondentes a lâmpada, obtém-se o mapa de resposta final. Divide-se as imagens de objeto de ciência por este mapa para corrigir as variações de ganho pixel a pixel e fibra a fibra. Na figura 2.4 apresenta-se uma imagem típica de *twilight* obtida com o instrumento GMOS e usado na redução dos dados.

2.6.4 Calibração em comprimento de onda

Usa-se os espectros de uma lâmpada de comparação para realizar a calibração dos espectros em comprimento de onda. Como o espectro obtido inicialmente não possui valores de comprimento de onda associados, esta etapa consiste em atribuir alguns valores de comprimento de onda conhecidos a um espectro de calibração, e em seguida aplicar essa calibração ao espectro observado. Para este caso, a lâmpada usada foi de CuAr (Cobre, Argônio). São usadas lâmpadas de calibração, devido ao fato, de as mesmas possuírem um espectro de emissão com um conjunto de comprimentos de onda espaçadas suficientemente, onde a radiação emitida é formada por comprimentos de onda bem definidos. Na figura 2.5 apresenta-se uma imagem típica da

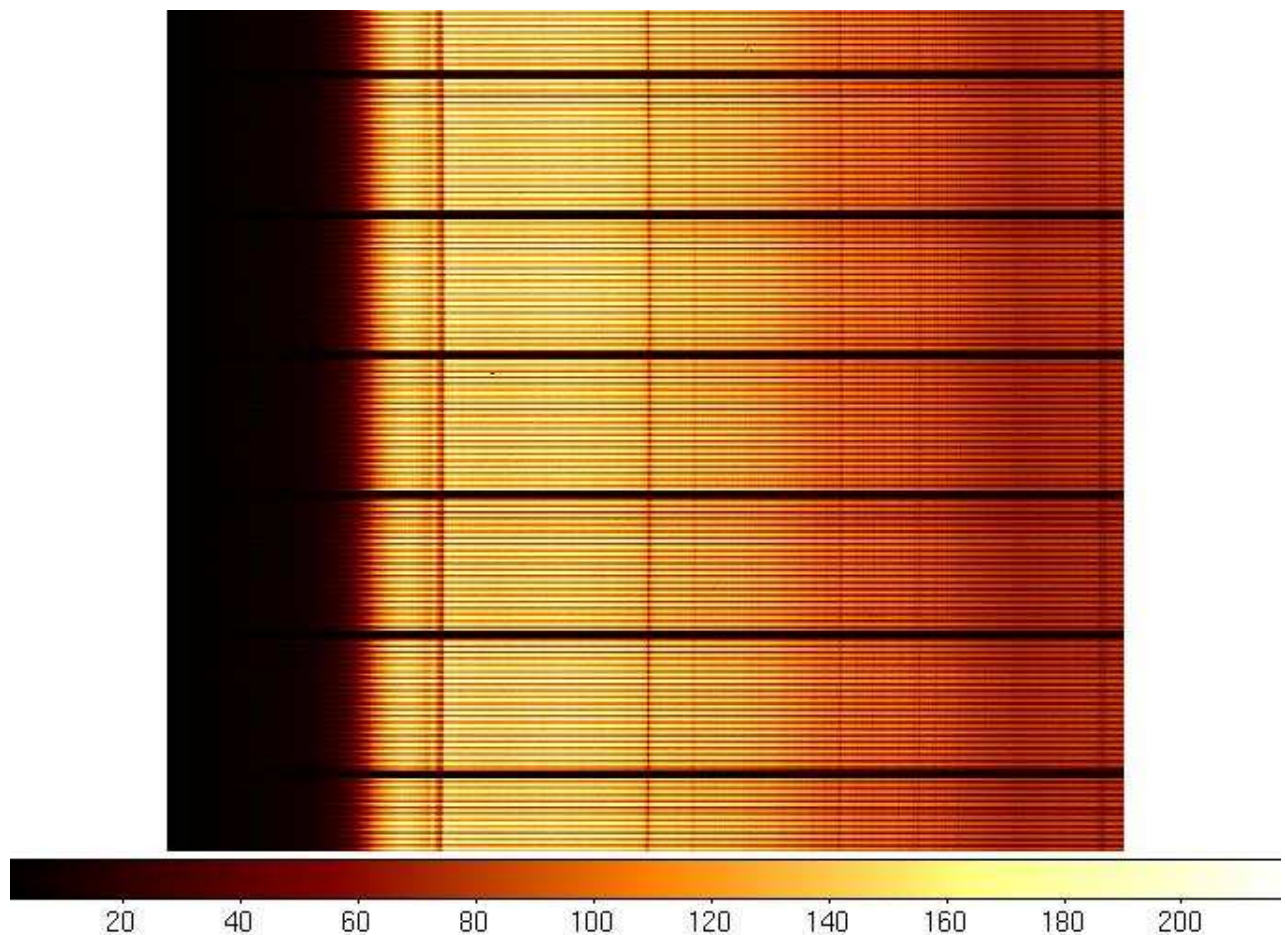


Figura 2.6: Imagem *twilight* obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.

lâmpada de comparação de CuAr obtida com o instrumento GMOS e usada na redução dos dados.

2.6.5 Estrela padrão de fluxo

Até esse momento do processo de redução, o espectro consiste em um gráfico do número de contagens em função do comprimento de onda. Nesta etapa da redução, esse espectro é transformado em um gráfico de fluxo em função do comprimento de onda. O espectro de uma estrela padrão é usado para obter uma relação entre o número de contagens e o fluxo correspondente aplicando-se essa relação no espectro do objeto que está sendo reduzido.

2.6.6 Construção do cubo de dados

Os cubos de dados individuais de cada galáxia foram criados usando a tarefa *gfcube* com píxeis espaciais quadrados de lado $0.05''$. Essa mesma tarefa realiza a correção da refração atmosférica

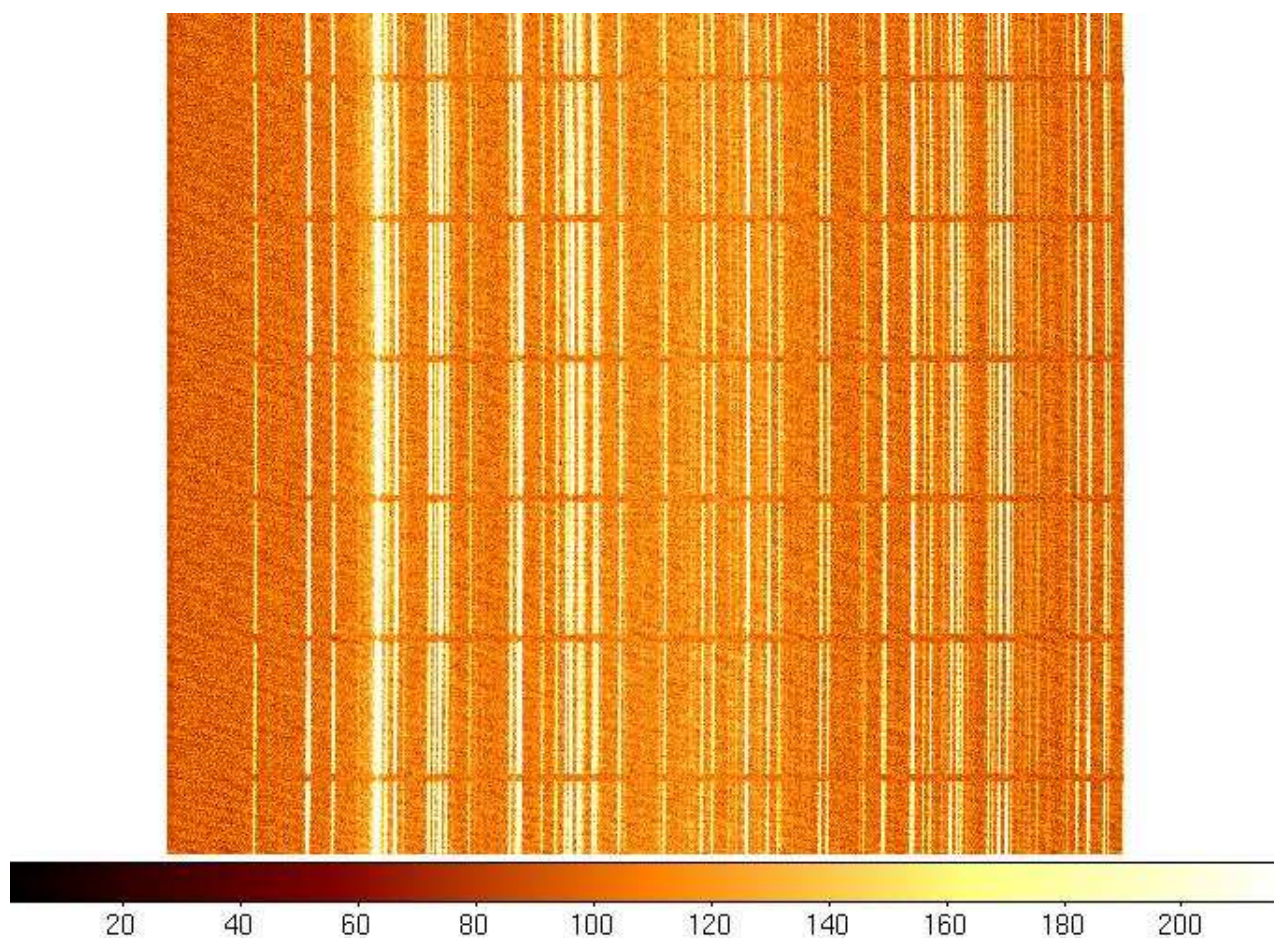


Figura 2.7: Imagem da lâmpada de comparação de CuAr obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.

diferencial, e usando a tarefa *gemcombine* obtemos um único cubo para cada galáxia, o cubo final. O cubo final de NGC 4501 contém 147×310 pixels² e 1926 pixels espectrais, com ~ 45570 espectros cobrindo o interior de $7'' \times 15''$ (três campos foram observados), com uma resolução espacial ~ 50 pc. Usando o arquivo da lâmpada de CuAr já calibrado, fazendo ajustes de curvas gaussianas em perfis típicos de linhas de emissão, a fim de obter a largura a meia altura do perfil da linha (FWHM) com a tarefa *splot* do IRAF, estimamos a resolução espectral de $\text{FWHM} \approx 2.7 \text{ \AA}$. A redução dos dados desta galáxia foi realizada durante o trabalho de conclusão de curs de graduação Bacharel em Física por Brum (2013).

O cubo final de NGC 3982 contém 143×306 pixels² e 1980 pixels espectrais, com ~ 43758 espectros cobrindo o interior de $7'' \times 15''$, com uma resolução espacial ~ 31 pc e resolução espectral $\text{FWHM} \approx 2.5 \text{ \AA}$. A redução dos dados dessa galáxia foi realizada anteriormente pelo Dr. Rogemar A. Riffel.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, descreveremos detalhes dos procedimentos adotados a fim de investigar os fenômenos físicos que ocorrem na região circumnuclear das duas galáxias, bem como a metodologia para obtenção de medidas associadas às propriedades físicas.

3.1 Filtragem Espacial de Butterworth

O procedimento seguinte no cubo de dados foi a aplicação da filtragem espacial de Butterworth, que consiste em remover ruídos de alta frequência espacialmente (pixel a pixel), através da transformada de Fourier, a qual permite que a função seja analisada com relação às suas componentes em frequência. Há duas categorias principais de filtros mais utilizados para o tratamento de imagens que são os filtros passa-alta e passa-baixa. Os filtros passa-alta eliminam as componentes de frequência mais baixa da imagem e os de passa-baixa as componente de frequência mais altas. O procedimento de filtragem espacial deste trabalho se deu utilizando os filtros de passa-baixa, de nome Butterworth de ordem n , que corresponde à multiplicação do filtro pelas transformadas de Fourier das imagens obtidas para cada pixel espectral do cubo. As vantagens de se utilizar um filtro de ordem n , é poder variar o valor de n , de valores mais baixos como 1 e 2, que não eliminam de forma tão eficaz as mais altas frequências, fazendo um corte suave, até 5 ou 6 por exemplo, nos quais as frequências altas são fortemente removidas, com corte mais abrupto. A tarefa utilizada para a filtragem foi a *bandpass_filter.pro* que faz parte da biblioteca de astronomia em linguagem IDL.

A frequência de corte (ν) utilizada para o tratamento do cubo de dados de NGC 4501 foi de $0.15 N_y^1$ e $n=3$ removendo de forma eficaz o ruído espacial, e para a NGC 3982 a frequência de corte utilizada foi de $0.2 N_y$ e $n=5$. Para chegarmos a conclusão de quais parâmetros seriam os

¹O critério de Nyquist (N_y) estabelece que, para que não haja nenhuma perda a frequência de amostragem (frequência de Nyquist) deve ser no mínimo o dobro da maior frequência presente no sinal. No limite de Nyquist para baixa frequência, o tempo total de observação T , só pode amostrar períodos menores que $T/2$ e de alta frequência, se o tempo de integração for t , só é possível medir períodos mais longos que $2t$.

mais adequados, realizamos diversos testes com n variando de 1 a 5 e v variando de 0.1 a 0.5 Ny, verificando para quais casos a remoção do ruído foi mais satisfatória e aumentou a razão sinal/ruído dos espectros.

Na figura 3.1 mostramos duas imagens de contínuo, obtidas a partir do cubo original (esquerda) e filtrada (centro) usando os parâmetros acima. No painel da direita, mostramos o mapa de resíduos: contínuo original – contínuo filtrado. Pode-se notar que a remoção do ruído de alta frequência promovida pela filtragem espacial de Butterworth no cubo de dados da galáxia NCG 4501 foi satisfatória.

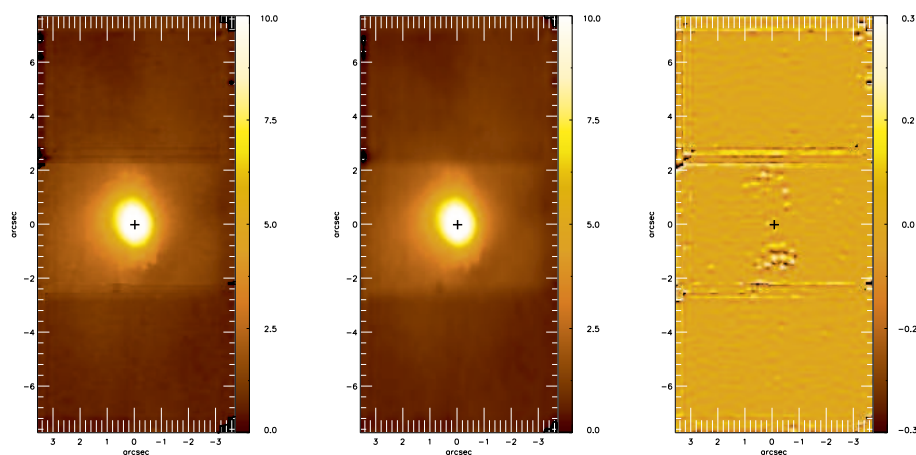


Figura 3.1: Imagem de contínuo do cubo de dados antes da filtragem (esquerda); imagem do contínuo após a filtragem espacial de Butterworth; resíduos correspondentes a diferença entre a imagem original e filtrada (direita), usou-se $n=3$ e frequência de corte de 0.15 Ny. Os fluxos estão mostrados em unidades de $10^{-17} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

3.2 Deconvolução de Richardson-Lucy

Após a filtragem espacial Butterworth o tratamento seguinte no cubo de dados foi a aplicação da deconvolução. Algoritmo introduzido por Richardson (1972) e Lucy (1974). É um processo iterativo, cujo objetivo é reverter o processo de convolução. Em termos astronômicos, uma imagem observada a partir da superfície terrestre, nada mais é do que a convolução da imagem original do objeto com uma PSF (*Point Spread Function*). O propósito da deconvolução é reverter esse efeito de convolução, para isso usamos um script em IDL escrito por Roberto B. Menezes (ver Menezes et al. (2014)), disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/pcatomography/>.

Na figura 3.2 apresentamos imagens de contínuo antes e depois da deconvolução. A esquerda temos uma imagem de contínuo apenas com filtragem espacial Butterworth sem deconvolução e a direita após a deconvolução.

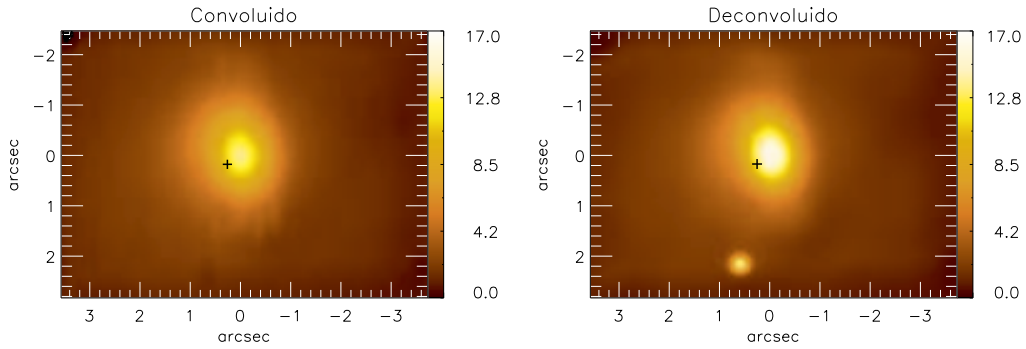


Figura 3.2: Imagens de contínuo da galáxia convoluida (painel esquerdo) e deconvoluida (painel direito)

3.3 Cinemática estelar com a técnica pPXF

Utilizamos a técnica *pPXF* (*penalized Pixel-Fitting*) de Cappellari e Emsellem (2004) para obter as distribuições de velocidades das estrelas ao longo da linha de visada (LOSVD - *Line-of-Sight Velocity Distribution*), derivando a LOSVD parametrizada por uma função Gauss-Hermite para cada espectro. Esse algoritmo encontra o melhor ajuste para um espectro da galáxia convoluindo espectros de templates estelares com uma função correspondente para LOSVD (Emsellem et al., 2004).

Utilizamos o *pPXF* para realizar medidas da cinemática estelar na região central das galáxias em um intervalo espectral entre 5890 a 6010 Å para NGC 4501, que inclui a absorção estelar do Na I, com comprimento de onda de repouso em 5897 Å e 5700 a 6550 Å para NGC 3982.

O ajuste do espectro com o *pPXF* requer o uso de uma biblioteca de espectros estelares como templates. Neste trabalho utilizamos espectros selecionados dos modelos de Bruzual e Charlot (2003) que possuem resoluções espectrais similares aos nossos dados.

Esta técnica é utilizada para obter a velocidade radial das estrelas (V_*), dispersão de velocidades estelar (σ_*) e os momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 (que medem os desvios LOSVD em relação a uma distribuição de velocidade Gaussiana) a partir de cada espectro. O parâmetro h_3 mede desvios assimétricos e o h_4 mede desvios simétricos (o achatamento) da LOSVD em relação a um perfil gaussiano (van der Marel; Franx, 1993). A minimização do χ^2 pode ser obtida a partir dos ajustes por mínimos quadrados não lineares dos parâmetros ($V_*, \sigma_*, h_3, \dots, h_M$).

3.4 Ajustes das linhas de emissão

Ajustamos curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão do gás H α , [N II] $\lambda\lambda 6548,6583$, [S II] $\lambda\lambda 6716,6730$ e [O I] $\lambda 6300$ usando uma versão modificada da rotina PROFIT (Emission Line PROFILE FITting routine (Riffel, 2010)), que faz ajustes por mínimos quadrados não lineares, fornecendo como parâmetros de saída mapas para o campo de velocidades, distribuições de fluxos e dispersões de velocidades.

As linhas H α e de [N II] foram ajustadas simultaneamente mantendo o mesmo valor para as larguras das linhas do [N II], uma vez que estas tem a mesma origem. O mesmo procedimento foi adotado para as linhas de [S II]. As velocidades são obtidas a partir do comprimento de onda central das linhas usando a equação para o efeito Doppler relativístico $v = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} c$, onde λ é o comprimento de onda medido, λ_0 é o comprimento de onda observado no vácuo e c é o módulo da velocidade da luz. Os fluxos são obtidos pela integral da curva gaussiana.

Na figura 3.3 apresentamos ajustes dos perfis a partir de três curvas Gaussianas para as linhas de H α e [N II] $\lambda\lambda 6548,6583$ da galáxia NGC 3982 para espectros obtidos com aberturas de $0.05'' \times 0.05''$ em diferentes posições da galáxia. Pode-se notar que os perfis das linhas de emissão são reproduzidos satisfatoriamente representados pelo ajuste em vermelho, as linhas verdes representam o resíduo após ajuste.

3.5 Channel maps

Essa técnica constitui-se em fazer cortes ao longo do perfil da linha de emissão, mapeando o fluxo do gás em pequenos intervalos de velocidades, a fim de obter uma melhor amostragem da cinemática do gás. Esses mapas são construídos depois de subtrair um valor médio do contínuo dos fluxos no contínuo adjacente a cada linha e integrar o perfil da linha de 2 em 2 píxeis espectrais. Assim obtém-se mapas bidimensionais para o fluxo da linha na velocidade correspondente.

3.6 Densidade Eletrônica

A partir da razão de duas linhas de excitação colisional de um mesmo íon, emitidas em transições entre níveis com energia de excitação muito próximas é possível calcular a densidade eletrônica de uma região. Se esses dois níveis têm diferentes probabilidades de transição radiativa ou taxa de desexcitação colisional, a população relativa destes níveis será altamente dependente da densidade eletrônica, assim como as razões de intensidades das linhas emitidas por estas transições terá igual dependência. Os melhores exemplos de razões de linha para determinar a densidade eletrônica são do [O I] e [S II]. Estas razões são usadas por serem mais intensas que outras razões de linhas. Os

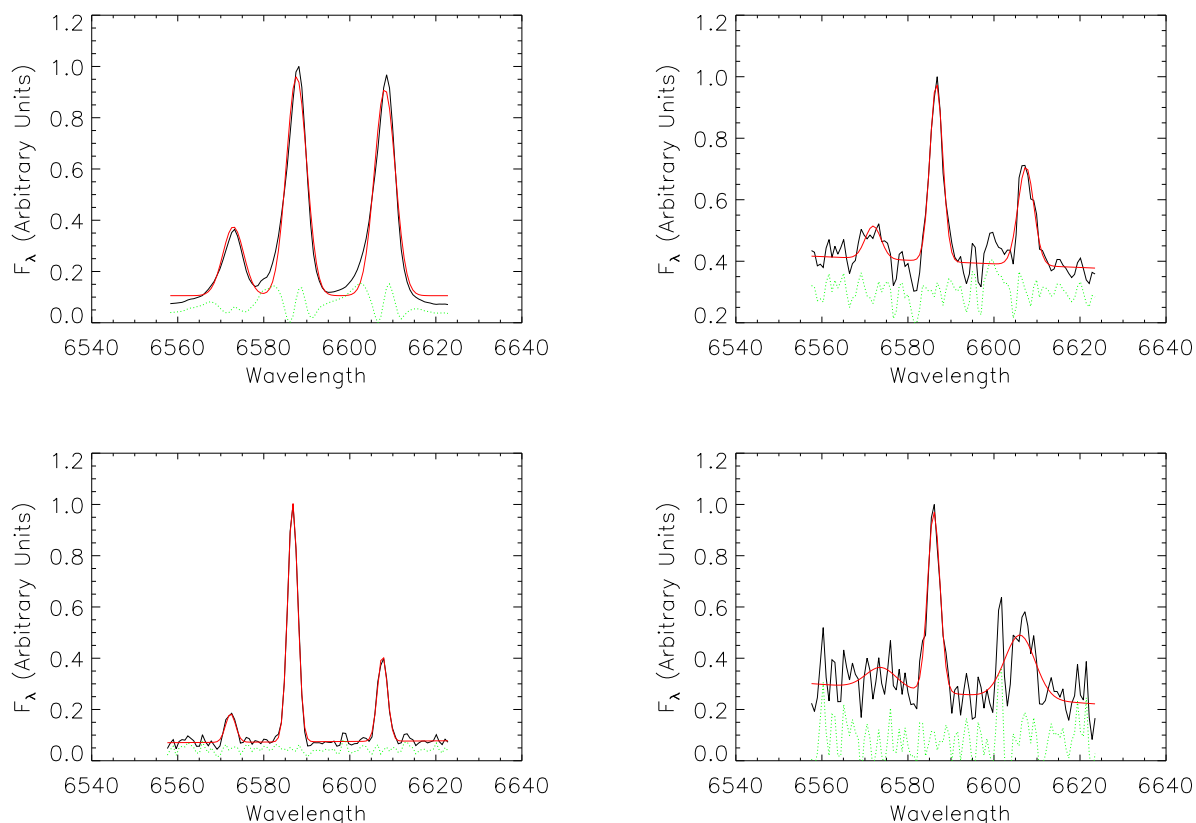


Figura 3.3: Ajustes de curvas Gaussianas para as linhas H α e [N II] $\lambda\lambda$ 6548,6583 em diferentes posições da galáxia NGC 3982.

parâmetros atômicos de oxigênio necessário para a determinação da densidade eletrônica são menos precisos do que os parâmetros de enxofre (Copetti; Writzl, 2002). Além disso as linhas de [S II] são bem separadas em comprimentos de onda e brilhantes o suficiente para serem usadas para determinar a densidade eletrônica (Riffel, 2004).

Determinamos a densidade eletrônica a partir da razão das linhas de enxofre ($[S II] \lambda 6716 / \lambda 6730$), obtendo um mapa de densidade, usando a tarefa *temden* do pacote *stsdas.nebular* do IRAF para ambas as galáxias.

3.7 Modelo de rotação

Um modelo cinemático pode ser ajustado quando os campos de velocidades apresentam um padrão de rotação, com o objetivo de obter parâmetros físicos como a velocidade sistêmica (velocidade de recessão da galáxia - v_s), a orientação da linha dos nodos (Ψ_0) e a posição do centro cinemático.

Ajustamos um modelo analítico simples aos nossos dados, o qual assume órbitas circulares em um plano, como feito em trabalhos anteriores (Barbosa et al. (2006), Riffel et al. (2008), Schnorr Müller

et al. (2011) e Couto et al. (2013)). A curva de rotação é dada por (Bertola et al. (1991)

$$v_c(r) = \frac{ar}{(r^2 + c_o^2)^{p/2}} \quad (3.1)$$

onde a é a amplitude de velocidade no plano da galáxia, c_o é um parâmetro de concentração e p é um parâmetro ajustado pelo modelo que pode variar de $1 \leq p \leq 3/2$ e r é o raio. Esta curva de rotação aumenta linearmente no centro e é proporcional a r^{1-p} no maior r . Para $p=1$ a curva de rotação é assintoticamente plana, enquanto que para $p=3/2$ o sistema tem uma massa total finita. Então para aplicação em galáxias espera-se que $1 \leq p \leq 3/2$.

A velocidade radial observada em uma posição (R, Ψ) no plano do céu está relacionada com a velocidade circular $v_c(r)$ pela equação dada por van der Kruit e Allen (1978). Para a curva de rotação encontramos explicitamente

$$V_{\text{mod}}(R, \Psi) = v_s + \frac{AR \cos(\Psi - \Psi_0) \sin(i) \cos^p(i)}{\{R^2 [\sin^2(\Psi - \Psi_0) + \cos^2(i) \cos^2(\Psi - \Psi_0)] + C_o^2 \cos^2(i)\}^{p/2}} \quad (3.2)$$

onde A é a amplitude de velocidade projetada no plano de céu, Ψ_o é o ângulo de posição da linha dos nodos, i é um parâmetro de concentração, i é a inclinação do disco da galáxia em relação ao plano do céu (i para um disco *face on*), R é a distancia radial ao núcleo projetada no plano do céu com o correspondente ângulo de posição Ψ e v_s é a velocidade sistêmica (Bertola et al., 1991).

O ajuste desta equação aos campos de velocidades foi realizado a partir de uma rotina escrita em IDL que utiliza a rotina MPFIT2DFUN² para aplicar o método de mínimos quadrados não linear.

²<http://www.physics.wisc.edu/~craigm/idl/fitqa.html>

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo apresentaremos os principais resultados encontrados para a cinemática do gás em torno do núcleo das galáxias NGC 4501 e NGC 3982 a partir das medidas das linhas de emissão mais intensas, bem como a cinemática estelar para a galáxia NGC 4501.

4.1 Resultados: NGC 4501

Na figura 4.1 apresenta-se o espectro nuclear, com as principais linhas de emissão identificadas $H\alpha$, $[N II] \lambda\lambda 6548, 6583$, $[S II] \lambda\lambda 6716, 6730$ e $[O I] \lambda 6300$. Observa-se que, o espectro nuclear de NGC 4501 apresenta assinatura de LINER, onde a linha de emissão do $[N II]$ é mais intensa que a linha de emissão do $H\alpha$. Outra observação são as linhas de enxofre, as quais possuem baixa razão sinal/ruído, porém suficientes para determinar a densidade eletrônica do gás.

No painel superior da figura 4.2 apresentamos uma imagem em grande escala da galáxia NGC 4501 obtida com o telescópio Kitt Peak de 0.9m do Kitt Peak National Observatory (KPNO) (Koopmann et al., 2001).

Aplicamos uma rotação à imagem de modo que ela tivesse a mesma orientação das observações obtidas com o GMOS.

No painel inferior esquerdo apresentamos um mapa de estruturas para a região central da galáxia construído a partir de uma imagem obtida com o telescópio espacial Hubble (Hubble Space Telescope - HST) com a Câmera Planetária de grande campo (Wide Field Planetary Camera 2 - WFPC2) usando o filtro F606W. O retângulo central mostra a região observada com a IFU do GMOS cobrindo uma área de $\approx 15'' \times 7''$ (3 campos). No painel inferior da direita apresentamos um mapa de fluxo da linha de $[N II]$ onde identificamos as posições em que extraímos espectros da galáxia mostrados nas figuras 4.3 e 4.4.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 exibimos espectros extraídos do cubo da galáxia para uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$ correspondentes às diferentes posições identificadas com letras de A até T no mapa de fluxo da

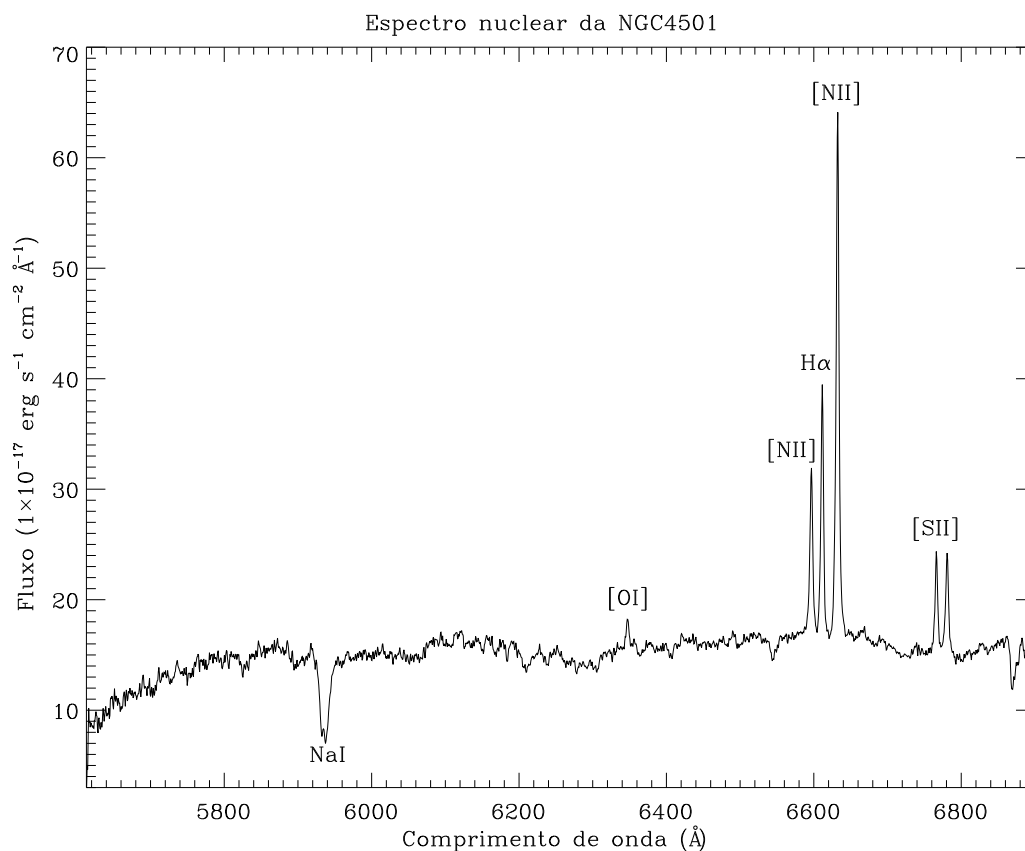


Figura 4.1: Espectro nuclear de NGC 4501 para uma abertura de $0.25'' \times 0.25''$ com as principais linhas de emissão $H\alpha$, $[N II] \lambda\lambda 6548, 6583$, $[S II] \lambda\lambda 6716, 6730$ e $[O I] \lambda 6300$ identificadas. A cruz central (+) marca a posição do núcleo

Figura 4.2, onde (+) corresponde ao espectro nuclear da galáxia. Identificamos as principais linhas de emissão $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e linha de absorção $NaI \lambda 5897 \text{ \AA}$.

4.2 Cinemática do Gás

Na Figura 4.5 apresentamos mapas das distribuições de fluxos para as linhas de emissão do gás. Observa-se que todas as linhas apresentam emissão estendida até $3''$ do núcleo com picos de fluxo ocorrendo no núcleo. O $[O I]$ apresenta distribuição mais compacta com emissão predominante no núcleo, enquanto que a linha do $[N II] \lambda 6585$ apresenta emissão que se estende até as bordas do campo observado.

Na Figura 4.6 apresentamos mapas bidimensionais para os campos de velocidades para as linhas de emissão de $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e $[O I]$ nos painéis superiores, assim como, mapas de erros nos painéis inferiores, ajustados pela rotina PROFIT para as linhas de emissão correspondentes aos painéis superiores.

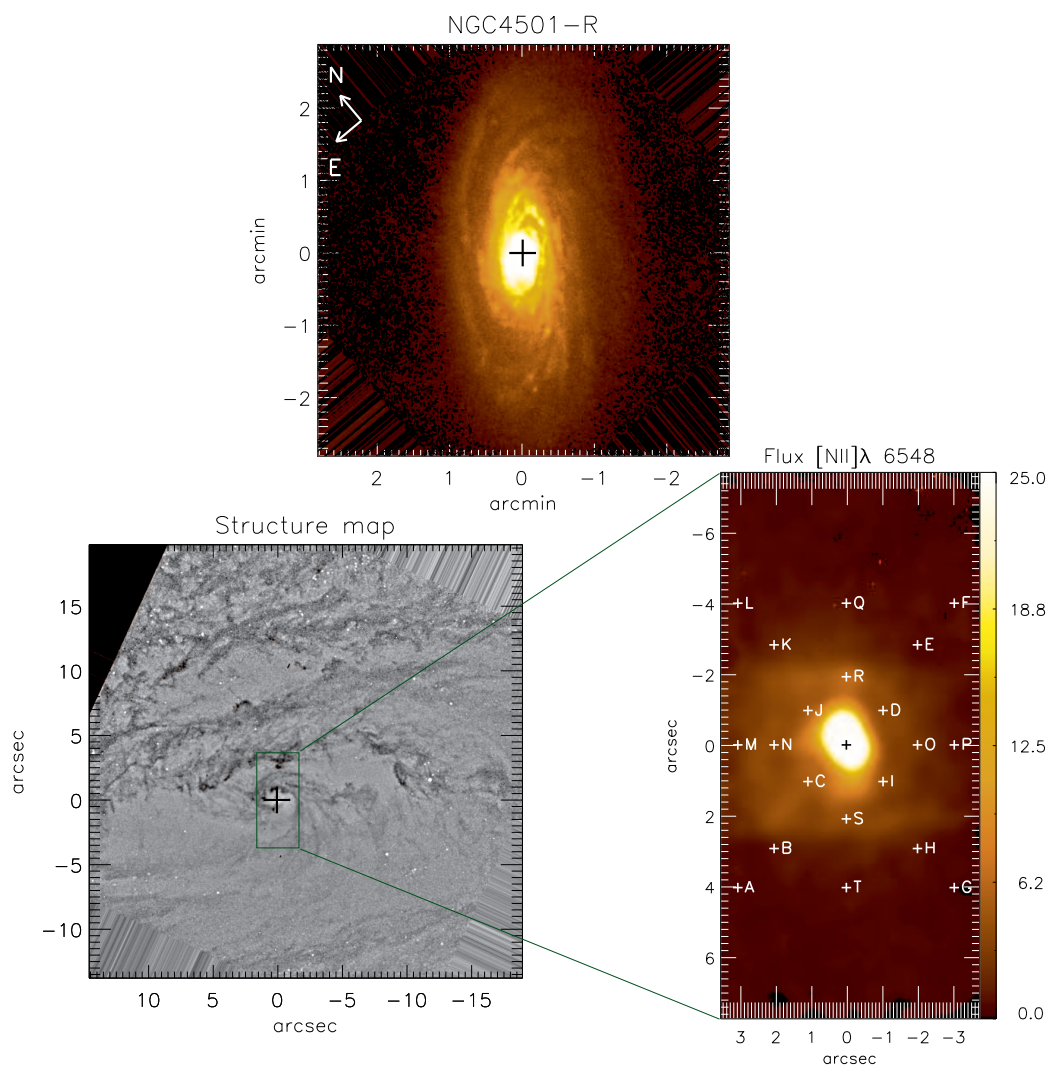


Figura 4.2: Painel superior: imagem em grande escala de NGC 4501 obtida com o telescópio Kitt Peak de 0.9 m. Painel inferior esquerdo: mapa de estrutura da galáxia obtida com HST - WFPC2 usando o filtro F606W. Painel inferior direito: imagem de contínuo para o fluxo da linha de [N II] com as posições onde foram extraídos espectros do cubo da galáxia. A cruz central (+) marca a posição do núcleo.

O campo de velocidades do gás é semelhante para todas as linhas. Apresenta um padrão de rotação no plano da galáxia, com uma amplitude de velocidade de cerca de 100 km s^{-1} , embora sejam vistos desvios de rotação pura em alguns locais. Em particular os excessos de blueshifts e redshifts, observados a norte e a sul do núcleo, respectivamente podem estar associados a escoamentos de gás em direção ao centro. Tal gás pode ser o combustível do buraco negro central. As regiões brancas dos mapas correspondem a regiões de medidas ruins, com erros maiores que 30%.

Na Figura 4.7 apresenta-se mapas para as dispersões de velocidades (σ) para as linhas de emissão do gás. As linhas proibidas apresentam valores de σ variando de 50 km s^{-1} a 150 km s^{-1} , enquanto que o $\text{H}\alpha$ geralmente apresenta valores menores, com os valores mais elevados atingindo $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$.

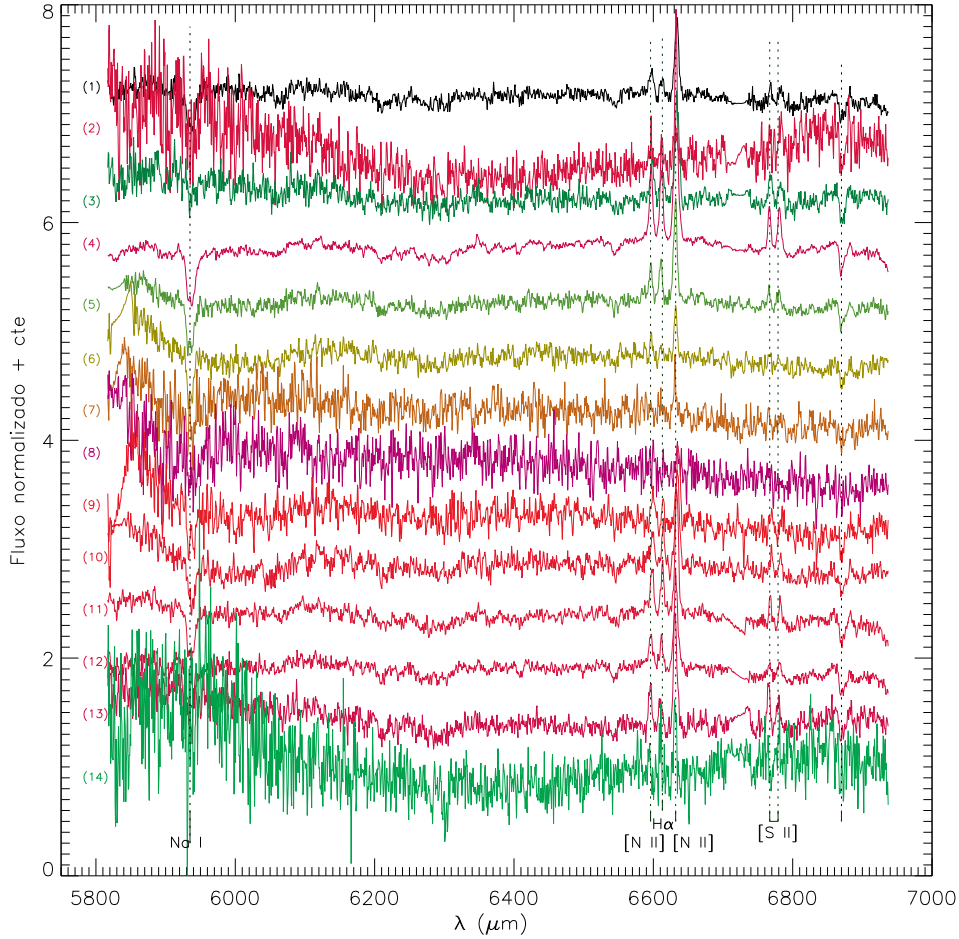


Figura 4.3: Espectros da galáxia NGC 4501 obtidos com uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$ para as posições indicadas no mapa de fluxo na Figura 4.2 correspondentes às letras de A até L. Identificamos as principais linhas de emissão de $H\alpha$, $[N II] \lambda\lambda 6548, 6583$, $[S II] \lambda\lambda 6716, 6730$ e $[O I] \lambda 6300$ e de absorção de $Na I \lambda 5897 \text{ \AA}$.

Os maiores valores de σ para todas as linhas de emissão são observados em $2-3''$ a nordeste do núcleo. Uma observação quanto aos mapas mostrados anteriormente são os pontos pretos presentes nos mapas, que correspondem a locais onde não foi possível analisar os espectros das linhas devido a uma baixa razão sinal/ruído.

4.3 Channel maps

Nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, apresentamos os *channel maps* para as linhas de emissão $H\alpha$, $[N II] \lambda\lambda 6548, 6583$, $[S II] \lambda\lambda 6716, 6730$ e $[O I] \lambda 6300$, respectivamente. Integramos os fluxos das linhas em fatias ou cortes ao longo do seu perfil de emissão, sendo que cada fatia corresponde a

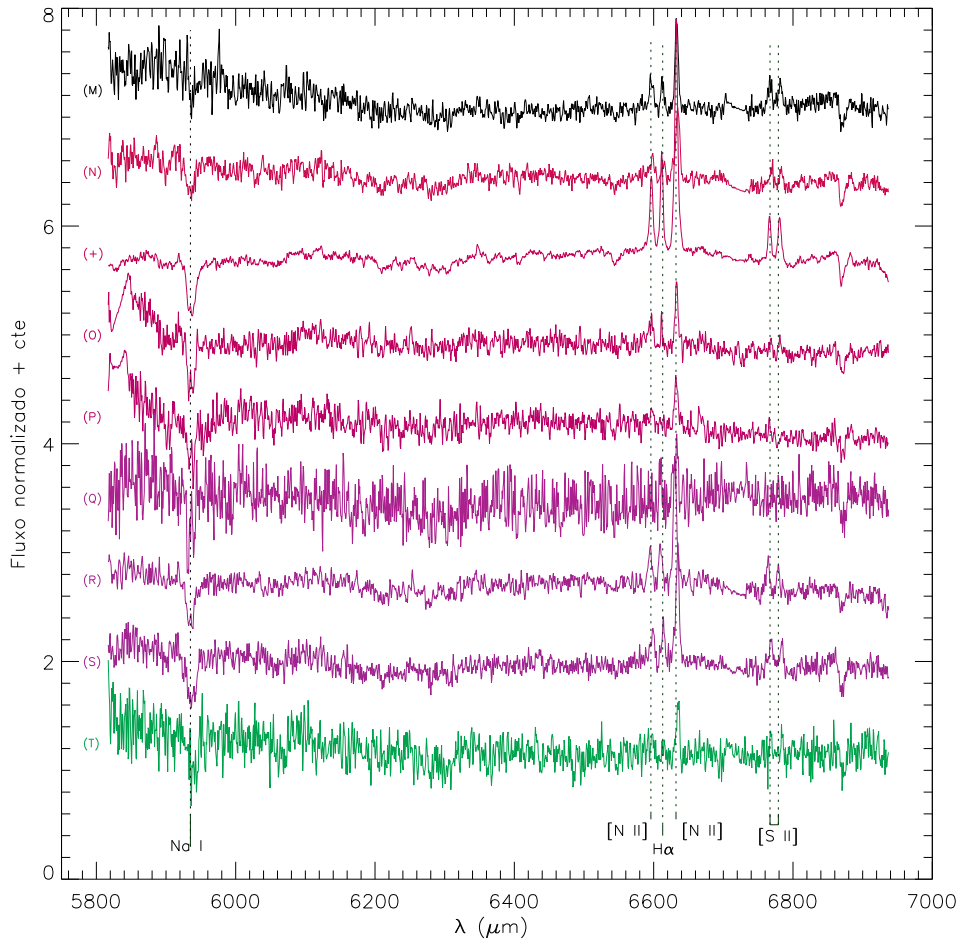


Figura 4.4: Espectros da galáxia NGC 4501 obtidos com uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$ para as posições indicadas no mapa de fluxo na Figura 4.2 correspondente às posições das letras M até T, com as principais linhas de emissão $H\alpha$, $[N II] \lambda\lambda 6548, 6583$, $[S II] \lambda\lambda 6716, 6730$ e $[O I] \lambda 6300$ e de absorção de $Na I \lambda 5897 \text{ \AA}$ identificadas. O espectro identificado como (+) corresponde ao espectro nuclear da galáxia.

dois pixels espectrais adjacentes, como explicado na sessão 3.5, resultando em um incremento de $\approx 64 \text{ km s}^{-1}$ entre um painel e outro, variando um pouco de acordo com a razão sinal/ruído de cada linha. No canto superior esquerdo de cada painel, são mostrados os valores das velocidades, em unidades de km s^{-1} . O fluxo está representado pela barra de cores a direita de cada figura e em unidades logarítmicas.

Na figura 4.8, *channel maps* para a linha de $H\alpha$, apresentam velocidades variando de negativas, *blueshifts* de $\approx -160 \text{ km s}^{-1}$, à positivas, *redshifts* de $\approx 350 \text{ km s}^{-1}$. Nos primeiros painéis a emissão concentra-se no núcleo, a medida que a velocidade aumenta, vai acentuando-se também na parte superior (à norte) e nos últimos painéis, apresenta-se mais estendida à sul, caracterizando *blueshifts* e (*redshifts*), respectivamente.

Na figura 4.9, apresentamos *channel maps* para a linha de $[N II] \lambda 6583 \text{ \AA}$, observa-se novamente, valores de *blueshifts* ao norte e nordeste e *redshifts* a sul e sudeste do núcleo, que variam, respectiva-

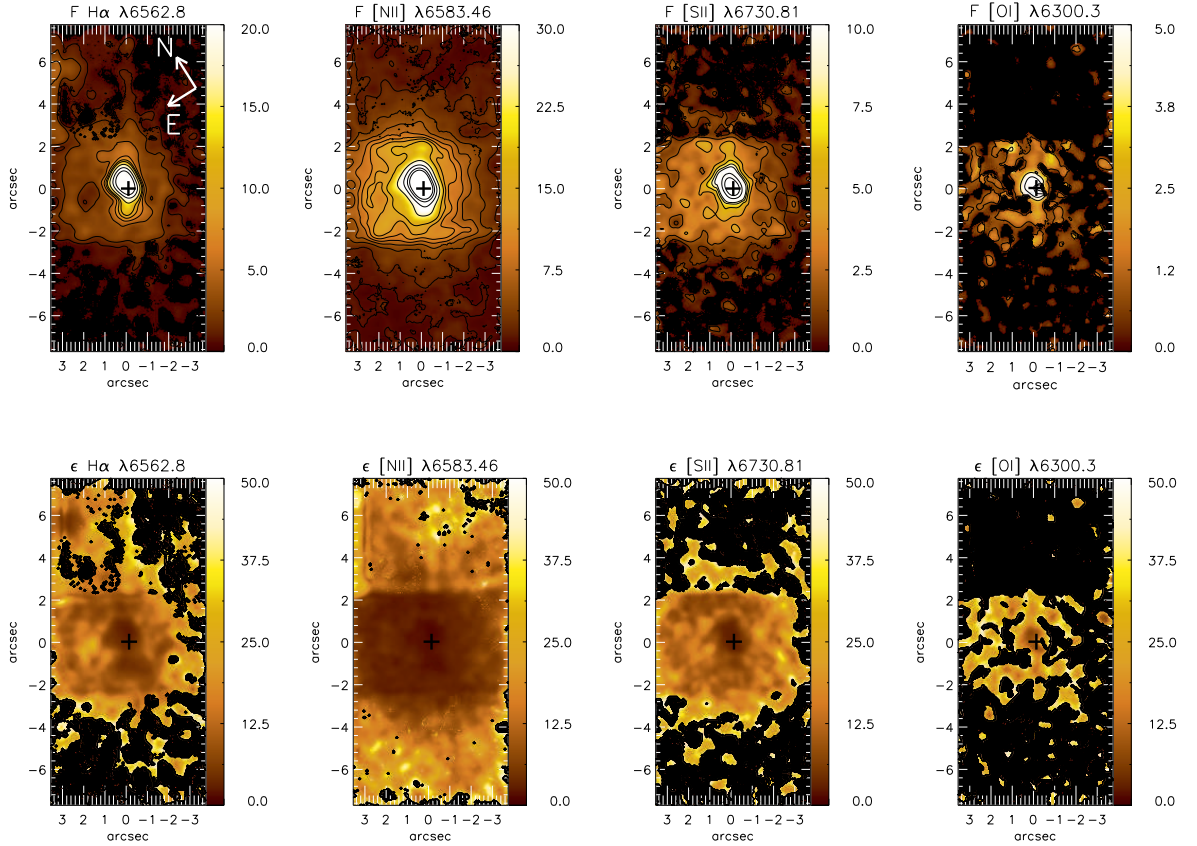


Figura 4.5: Mapas de fluxos para as linhas de emissão $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e $[O I]$ obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. Os fluxos são mostrados em unidades de $10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. A cruz marca a posição do núcleo.

mente de $\approx -250 \text{ km s}^{-1}$ até $\approx 330 \text{ km s}^{-1}$.

Nas figuras 4.10 e 4.11, mostram-se os *channel maps* para a linha de $[S II] \lambda 6716 \text{ \AA}$ e $[O I] \lambda 6300 \text{ \AA}$, respectivamente. Ambas as linhas têm tendência a apresentar o mesmo comportamento das linhas anteriores, porém as distribuições de fluxos são muito mais ruidosas em comparação as linhas anteriores, com emissão maior no núcleo pegando as asas do perfil das linhas.

4.4 Cinemática estelar

A cinemática estelar foi obtida através da técnica pPXF, discutida anteriormente na seção 3.3, a partir de ajustes da linha de absorção do $\text{Na I } \lambda 5897 \text{ \AA}$ no cubo de dados da galáxia NGC 4501.

O campo de velocidade (painel da esquerda) apresenta uma amplitude de velocidade de 90 km s^{-1} e dispersão de velocidades das estrelas (painel da direita), com valores variando entre 70 e 190 km s^{-1} . Somente conseguimos bons ajustes na região próxima do núcleo, em distâncias menores que $2''$ deste,

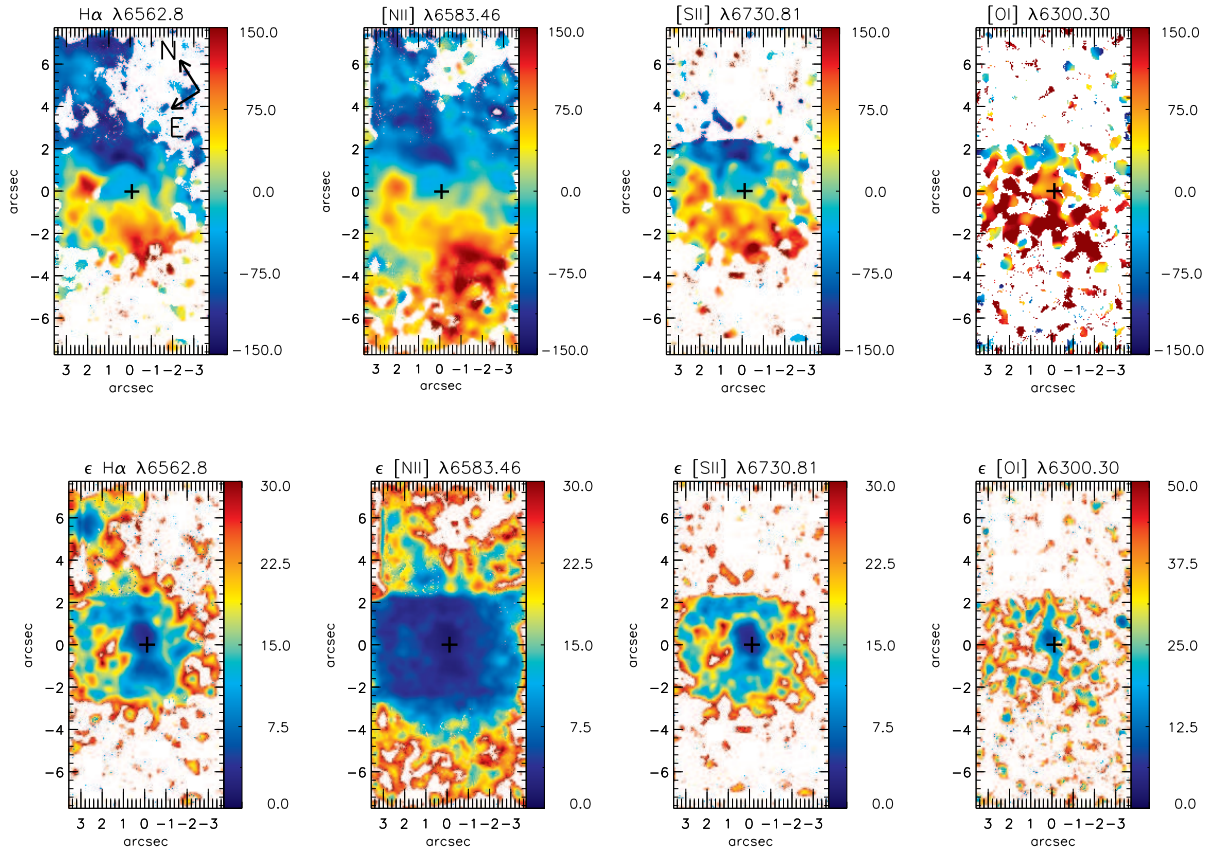


Figura 4.6: Campos de velocidades para as linhas de emissão $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e $[O I]$ obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. As barras de cores mostram a escala em km s^{-1} . A cruz marca a posição do núcleo.

devido a baixa razão sinal/ruído na linha de $Na I$ nos espectros mais externos.

4.5 Resultados: NGC 3982

O espectro nuclear da galáxia NGC 3982, com as principais linhas de emissão $H\alpha$, $[N II]$ $\lambda\lambda 6548, 6583$, $[S II]$ $\lambda\lambda 6716, 6730$ e $[O I]$ $\lambda\lambda 6300, 6363$ identificadas apresenta-se na figura 4.13. No painel superior da figura 4.14 apresentamos uma imagem em grande escala da galáxia NGC 3982 obtida com o telescópio espacial Hubble (Hubble Space Telescope - HST) com a Câmera Planetária de grande campo (Wide Field Planetary Camera 2 - WFPC2) usando o filtro F606W (Malkan et al., 1998). Aplicamos uma rotação à imagem de modo que ela tivesse a mesma orientação das observações obtidas com o GMOS.

No painel inferior esquerdo apresentamos um mapa de estrutura para a região central da galáxia construída a partir de uma imagem obtida com o HST com WFPC2 usando o filtro F606W (Simões

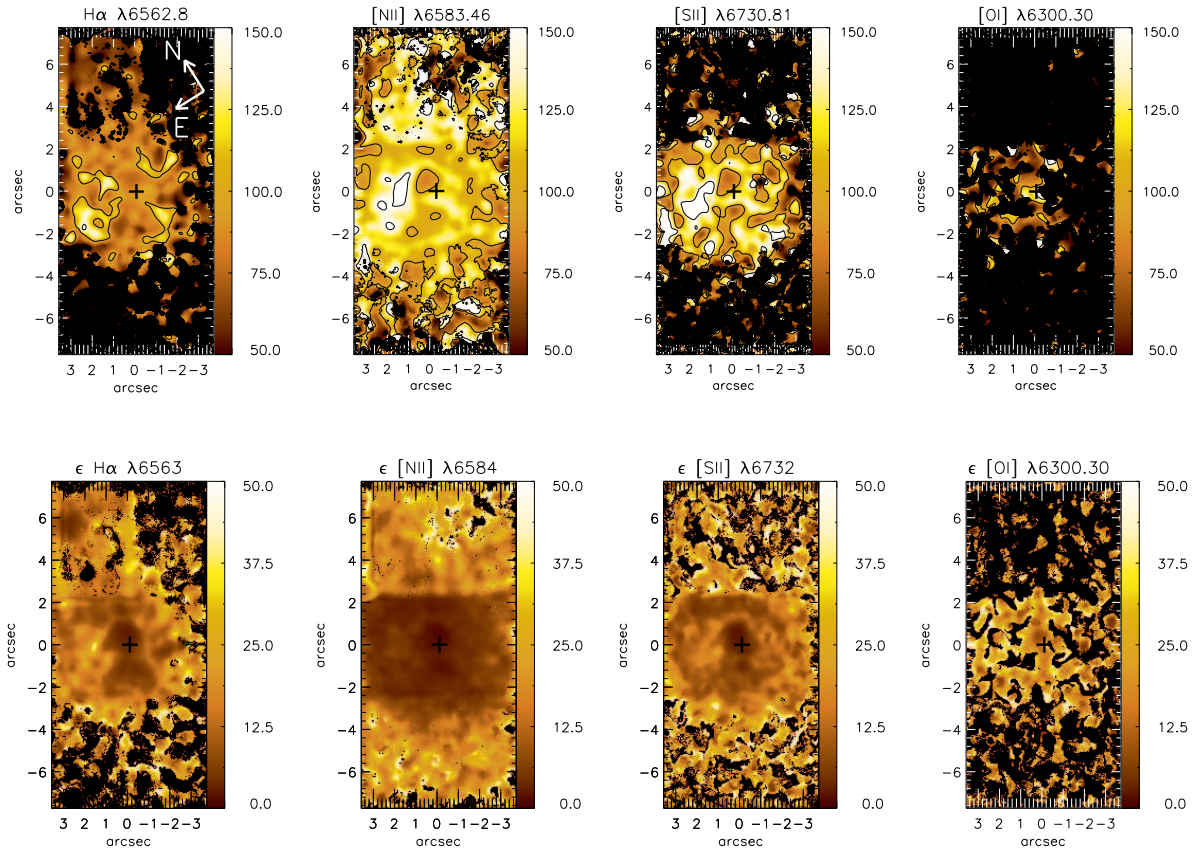


Figura 4.7: Mapas de σ para as linhas de emissão $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e $[O I]$ obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. As barras de cores mostram a escala em km s^{-1} . A cruz marca a posição do núcleo.

Lopes et al., 2007). O retângulo central mostra a região observada com a IFU do GMOS cobrindo uma área de $\approx 15 \times 7''$. No painel inferior da direita apresentamos uma imagem do mapa de fluxo da linha de $[N II]$ onde identificamos as posições em que extraímos espectros da galáxia mostrados nas Figuras 4.15 e 4.16.

4.6 Cinemática do Gás

Na Figura 4.17 apresentamos mapas das distribuições de fluxos para as linhas de emissão do gás. Observa-se que todas as linhas apresentam emissão estendida em praticamente todo o campo observado com picos de fluxo ocorrendo no núcleo.

Apresentamos mapas bidimensionais para os campos de velocidades para as linhas de emissão do gás de $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e $[O I]$, na figura 4.18 nos painéis superiores, assim como, mapas de erros nos painéis inferiores, ajustados pela rotina PROFIT para as linhas de emissão correspondentes aos

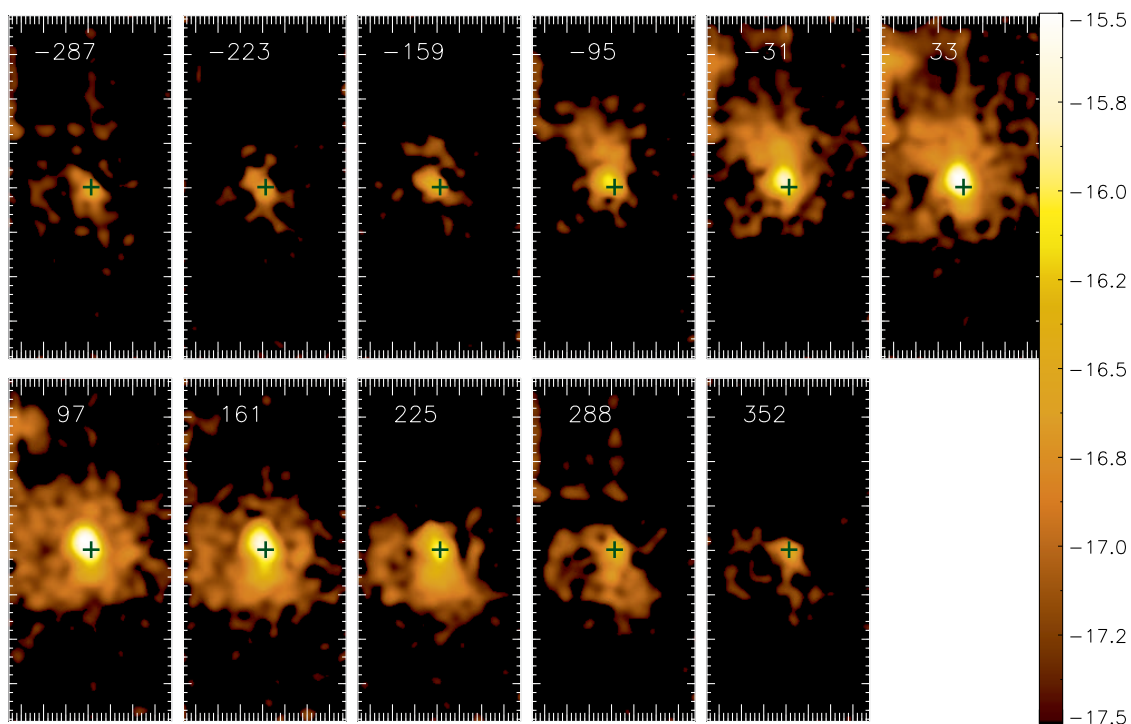


Figura 4.8: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do $H\alpha$. O valor da velocidade está no canto superior esquerdo de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

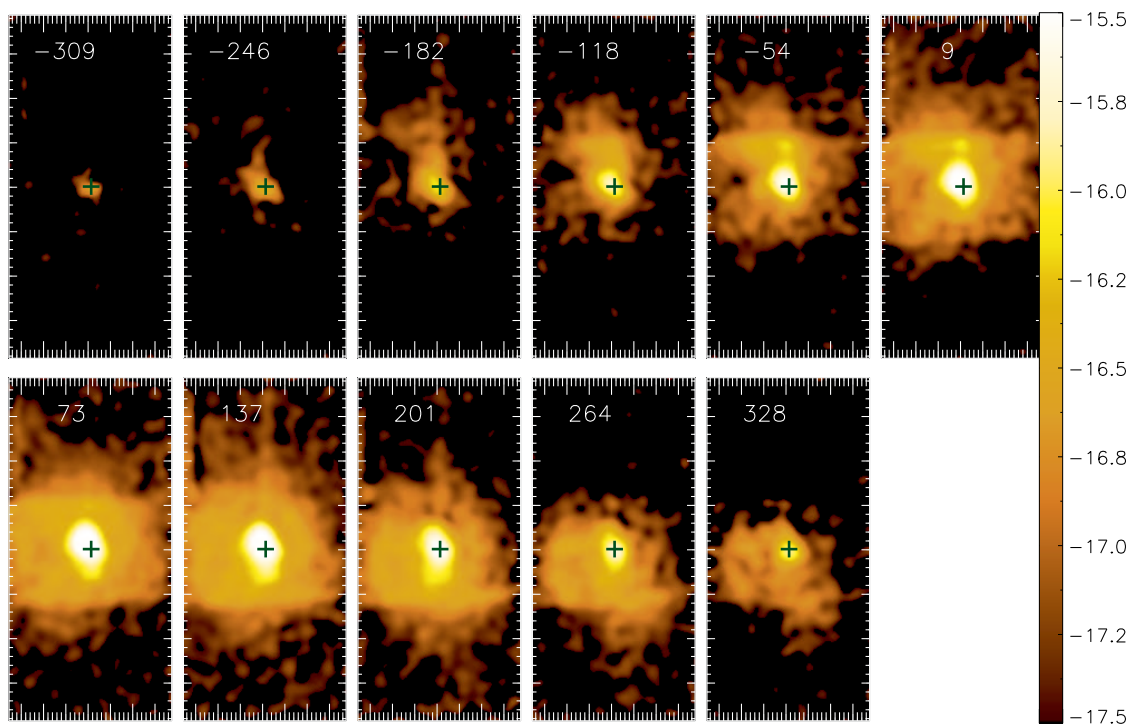


Figura 4.9: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do $[\text{N II}] \lambda 6583\text{\AA}$. O valor da velocidade está na parte superior de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

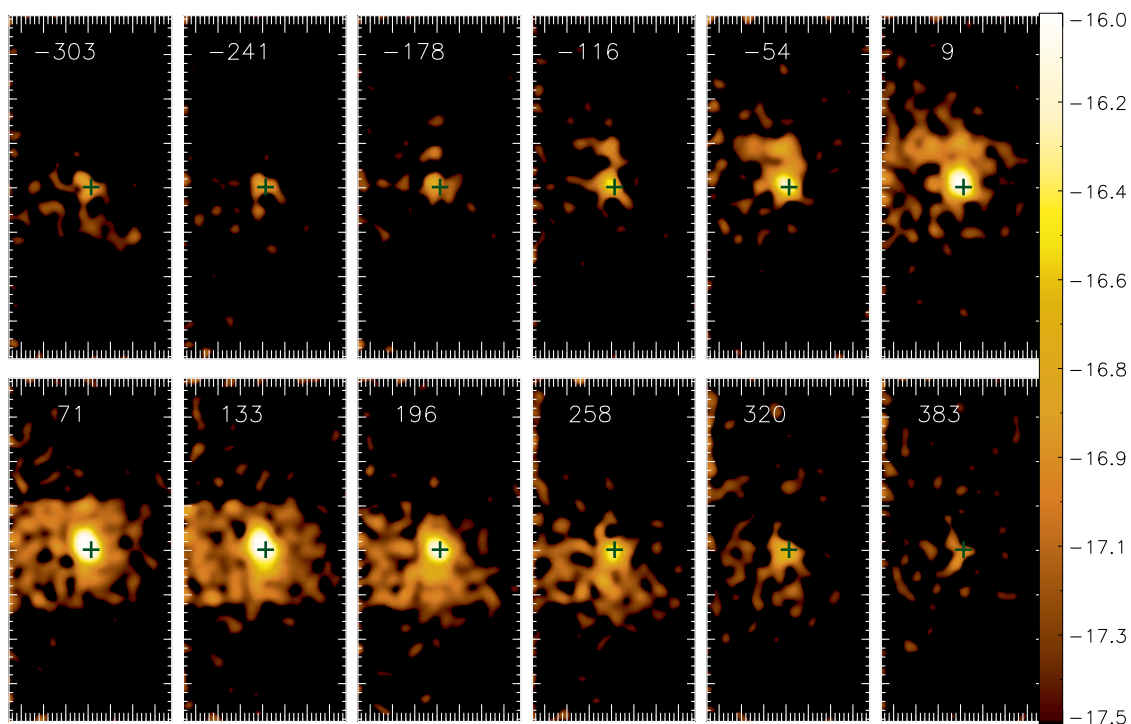


Figura 4.10: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do [S II] λ 6716 Å. O valor da velocidade está na parte superior de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

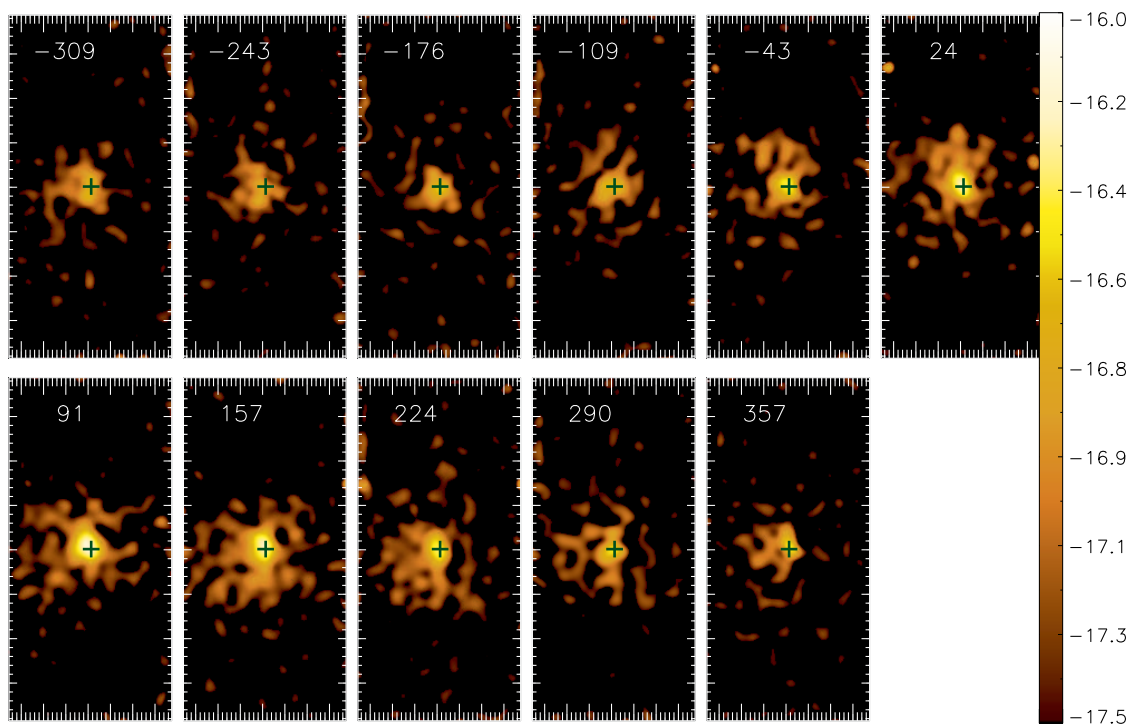


Figura 4.11: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do [O I] λ 6300 Å. O valor da velocidade está na parte superior de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

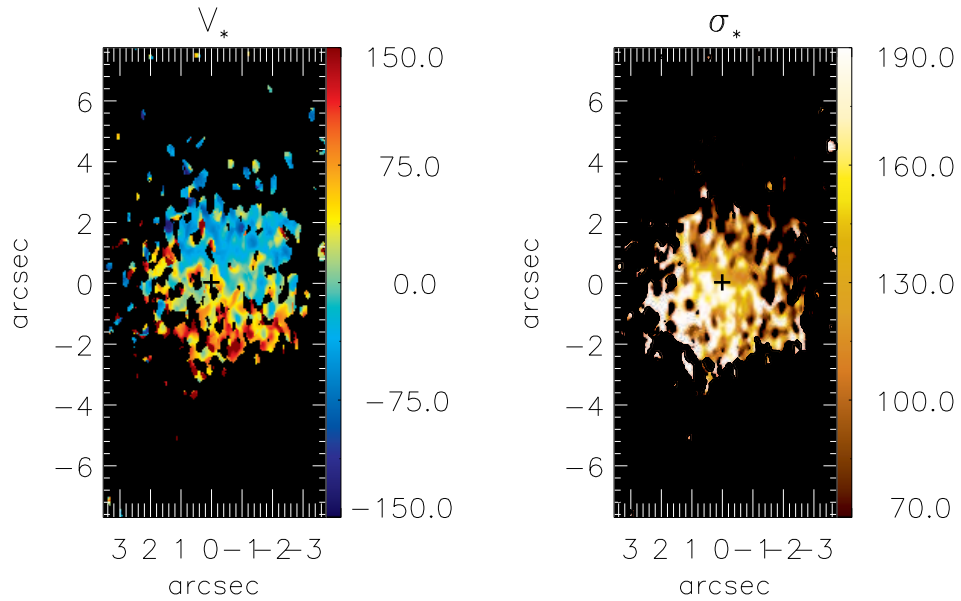


Figura 4.12: Campos de velocidade estelar (esquerda) e mapa de dispersão de velocidade estelar (direita). As barras de cores mostram a escala em km s^{-1} .

painéis superiores.

O campo de velocidade do gás é semelhante para todas as linhas. Apresenta um padrão de rotação no plano da galáxia, com uma amplitude de velocidade de 100 km s^{-1} .

A velocidade sistêmica foi determinada pela subtração dos campos de velocidade para todas as linhas. As regiões brancas dos mapas correspondem a regiões de medidas ruins.

Na Figura 4.19 apresenta-se mapas para as dispersões de velocidades (σ). As linhas proibidas apresentam valores de σ variando de 50 km s^{-1} a 150 km s^{-1} , enquanto que o $\text{H}\alpha$ geralmente apresenta valores menores de σ , com os valores mais elevados chegando a $\sim 120 \text{ km s}^{-1}$. Os maiores valores de σ para todas as linhas de emissão são observados a $1''$ a leste do núcleo. Uma observação quanto aos mapas mostrados anteriormente são os pontos pretos presentes nos mapas, que correspondem a locais onde não foi possível analisar as linhas devido a uma baixa razão sinal/ruído.

4.7 Channel maps

Nas figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23, mostramos *channel maps* para as linhas de $\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]$, $[\text{S II}]$ e $[\text{O I}]$, respectivamente. Apresentam um incremento de velocidade entre um painel e outro de $\approx 63 \text{ km s}^{-1}$. As distribuições de velocidades são diferentes para cada linha de emissão. Tanto os *channel maps* de $\text{H}\alpha$, de $[\text{N II}]$ quanto de $[\text{S II}]$ apresentam comportamento similar, com maior emissão de fluxo no núcleo, e valores de velocidade variando de negativos (*blueshift*) à positivos (*redshift*),

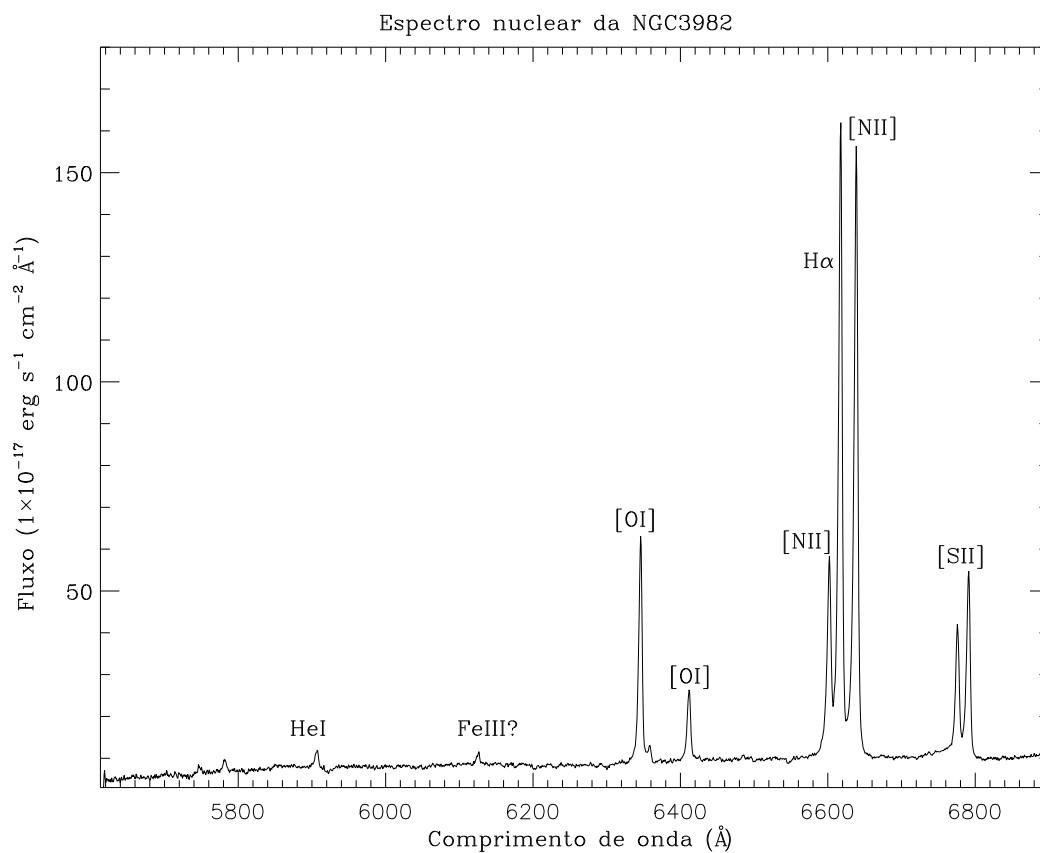


Figura 4.13: Espectro nuclear de NGC 3982 com as principais linhas de emissão H α , [N II] $\lambda\lambda$ 6548,6583, [S II] $\lambda\lambda$ 6716,6730 e [O I] $\lambda\lambda$ 6300,6363 identificadas.

com um padrão de rotação de leste para oeste, enquanto que, para a linha de [O I], os *channel maps* apresentam emissão maior no núcleo.

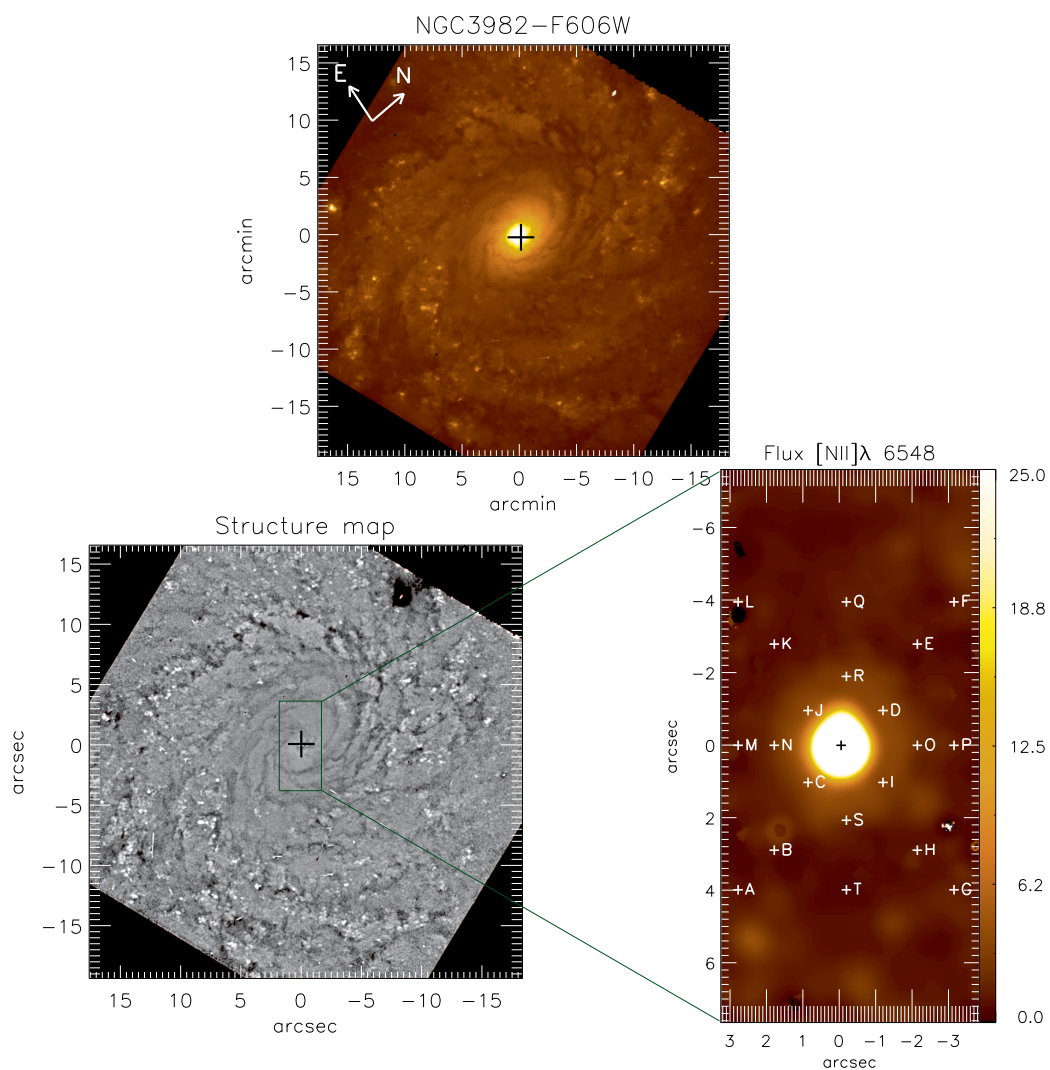


Figura 4.14: Painel superior: imagem em grande escala de NGC 3982 obtida com HST. Painel inferior esquerdo: mapa de estrutura da galáxia obtida com HST - WFPC2 usando o filtro F606W. Painel inferior direito: imagem de contínuo para o fluxo da linha de [N II] com as posições onde foram extraídos espectros do cubo da galáxia.

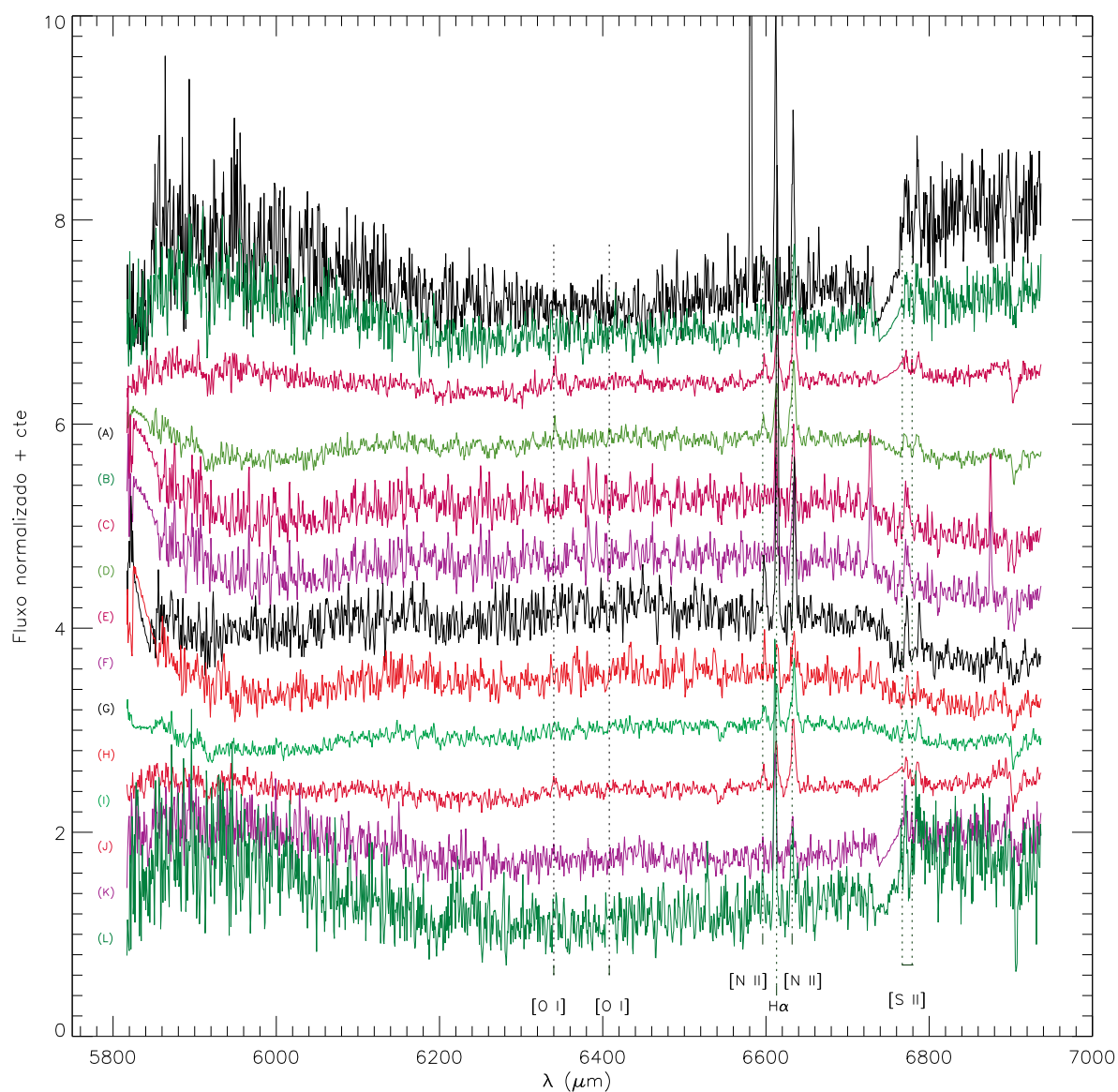


Figura 4.15: Espectros da galáxia NGC 3982 obtidos com uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$ para as posições indicadas no mapa de fluxo na Figura 4.14 correspondentes às letras de A até L. Identificamos as principais linhas de emissão de $H\alpha$, [N II], [S II] e [O I].

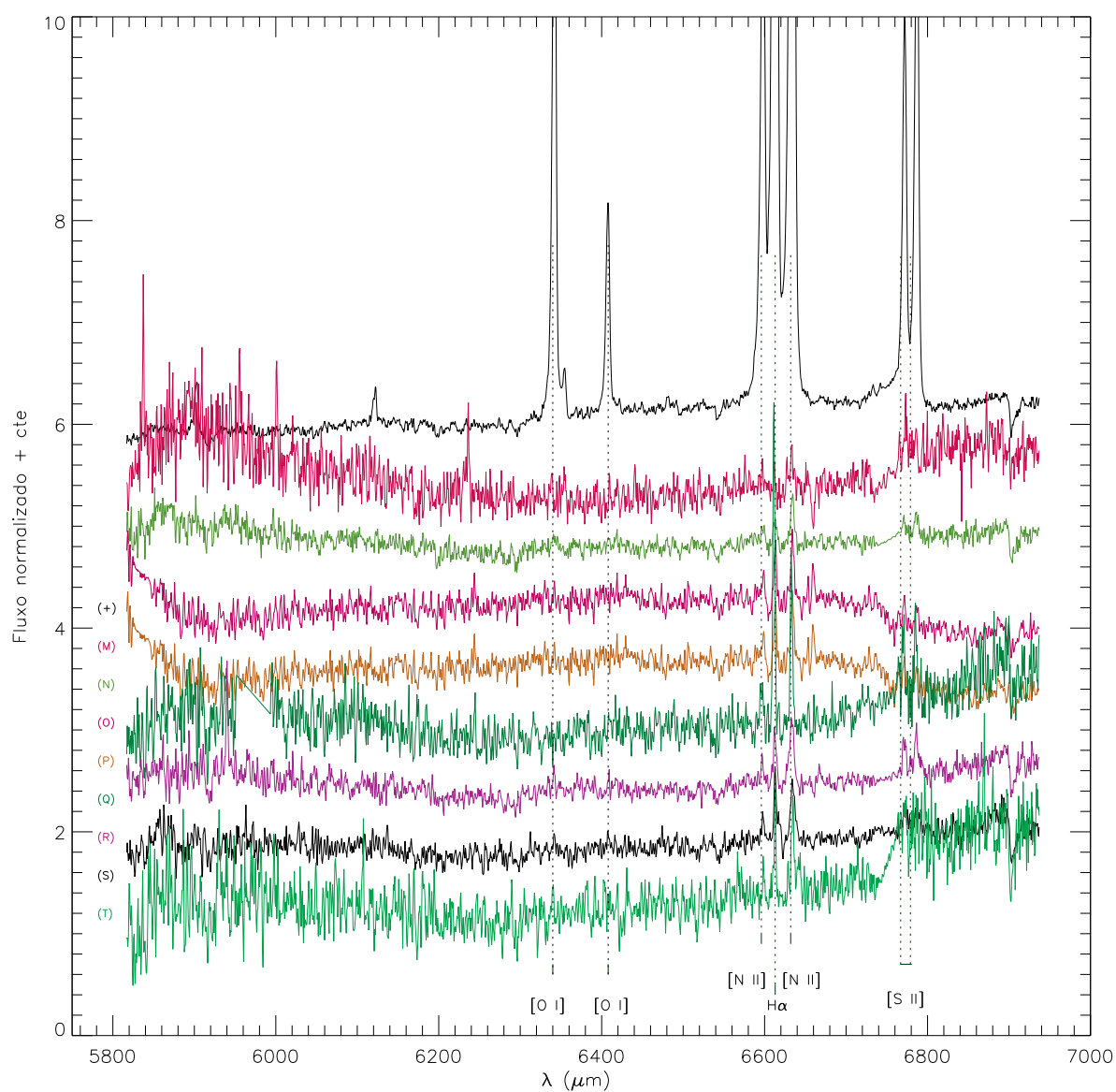


Figura 4.16: Espectros da galáxia NGC 3982 obtidos com uma abertura de $0.05'' \times 0.05''$ para as posições indicadas no mapa de fluxo na Figura 4.14 correspondente às posições das letras M até T, com as principais linhas de emissão $H\alpha$, [N II], [S II] e [OI] identificadas. O espectro identificado como (+) corresponde ao núcleo da galáxia.

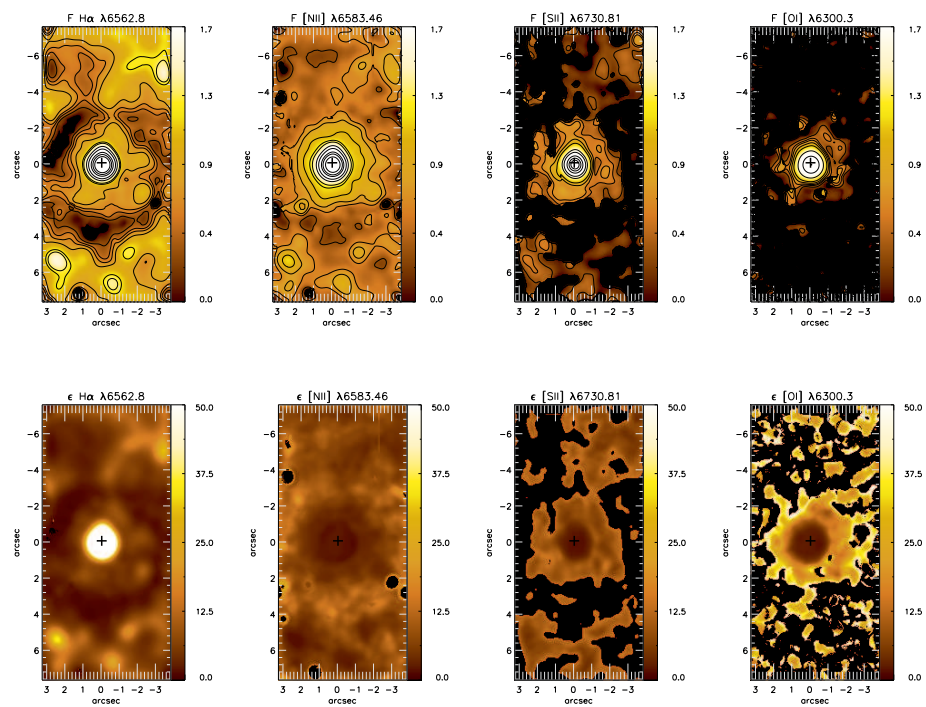


Figura 4.17: Mapas de fluxos para as linhas de emissão $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e $[O I]$ obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. Os fluxos são mostrados em unidades de $10^{-17} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ e os erros estão em percentuais de fluxos.

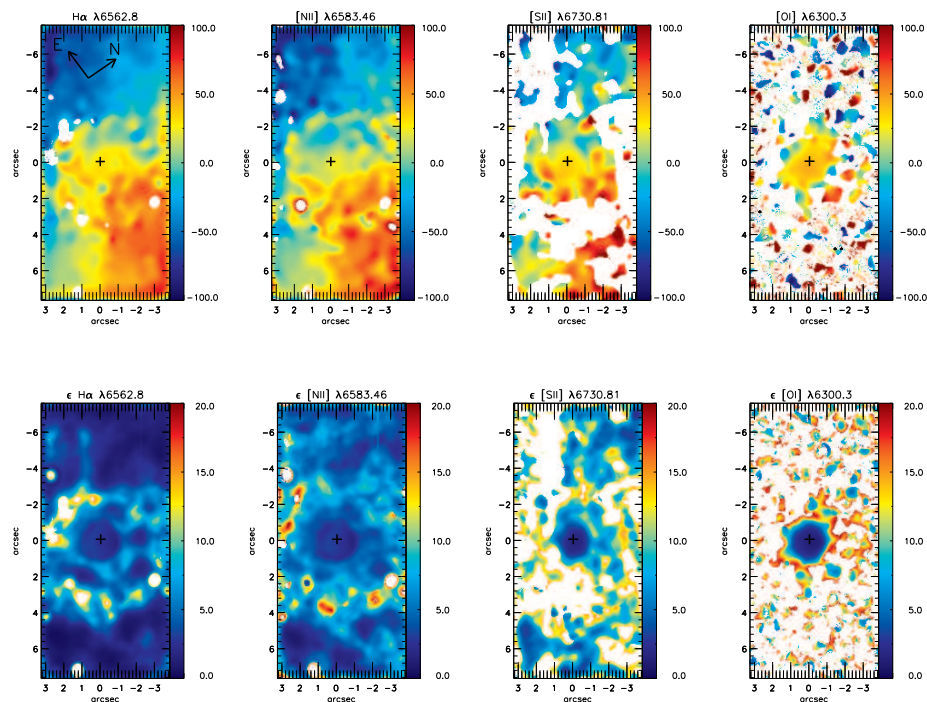


Figura 4.18: Campos de velocidades para as linhas de emissão H α , [N II], [S II] e [O I] obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. As barras de cores mostram a escala em km s^{-1} .

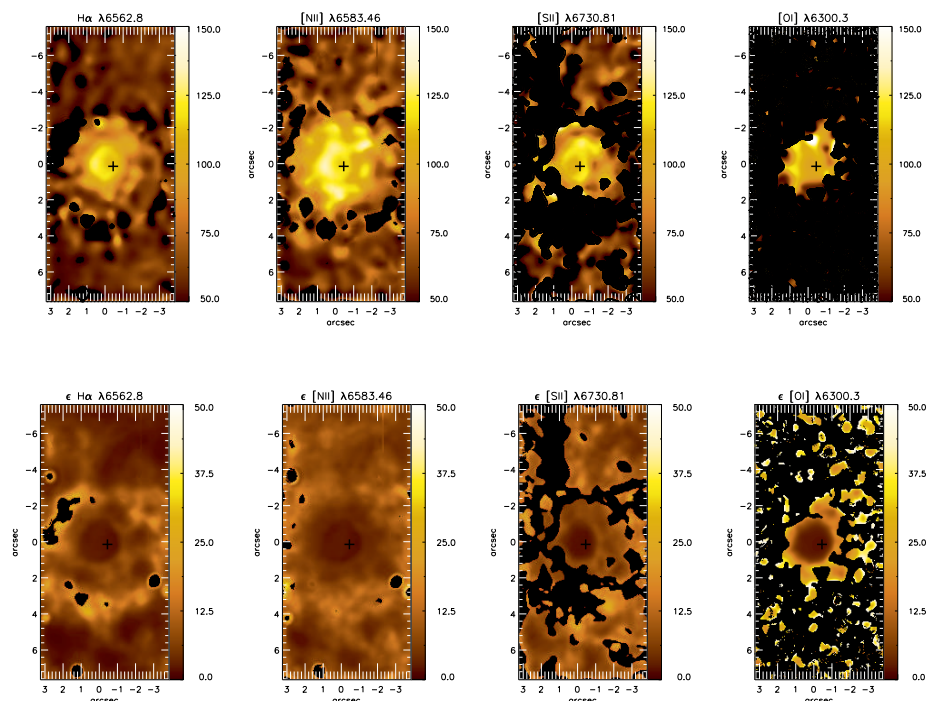


Figura 4.19: Mapas de σ para as linhas de emissão H α , [N II], [S II] e [O I] obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. As barras de cores mostram a escala em km s^{-1} .

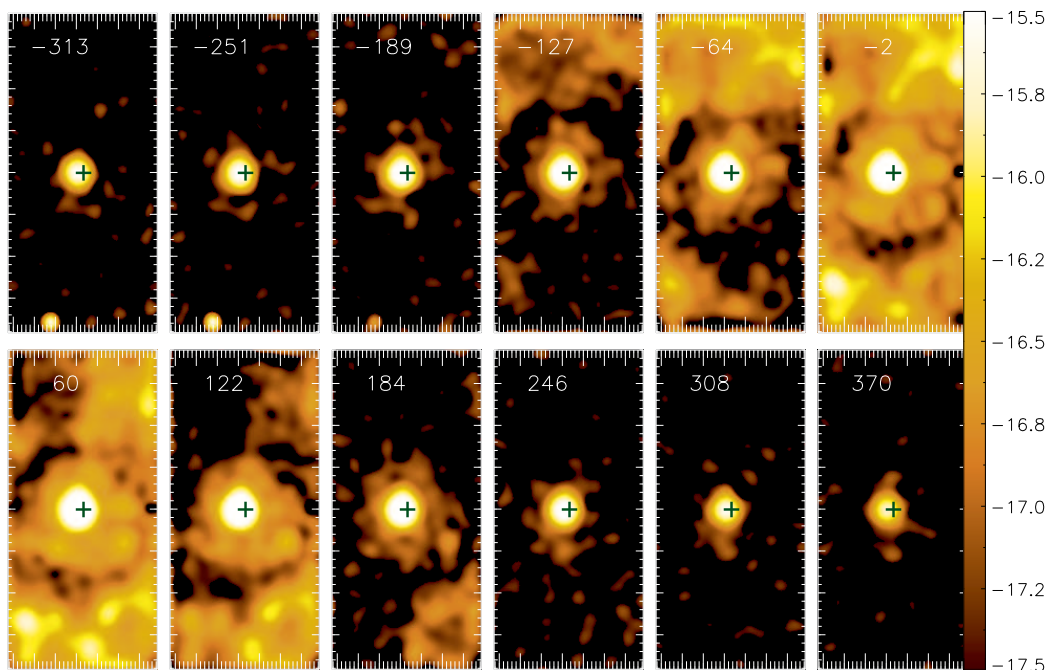


Figura 4.20: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do $H\alpha\lambda 6562 \text{ \AA}$. O valor da velocidade está no canto superior esquerdo de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

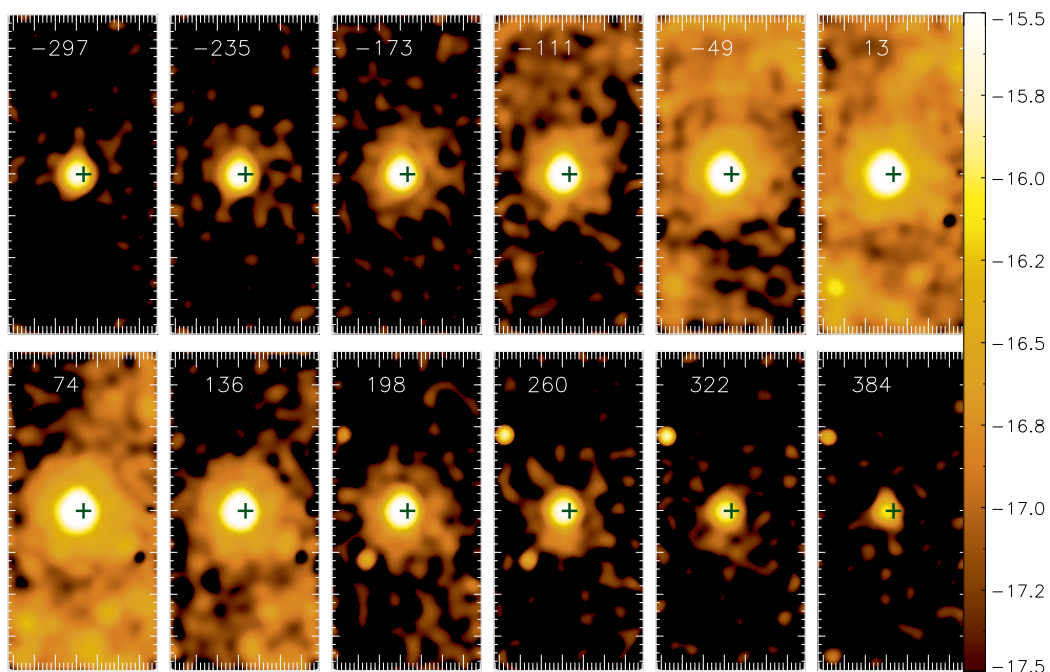


Figura 4.21: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do $[N II]\lambda 6583 \text{ \AA}$. O valor da velocidade está na parte superior de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

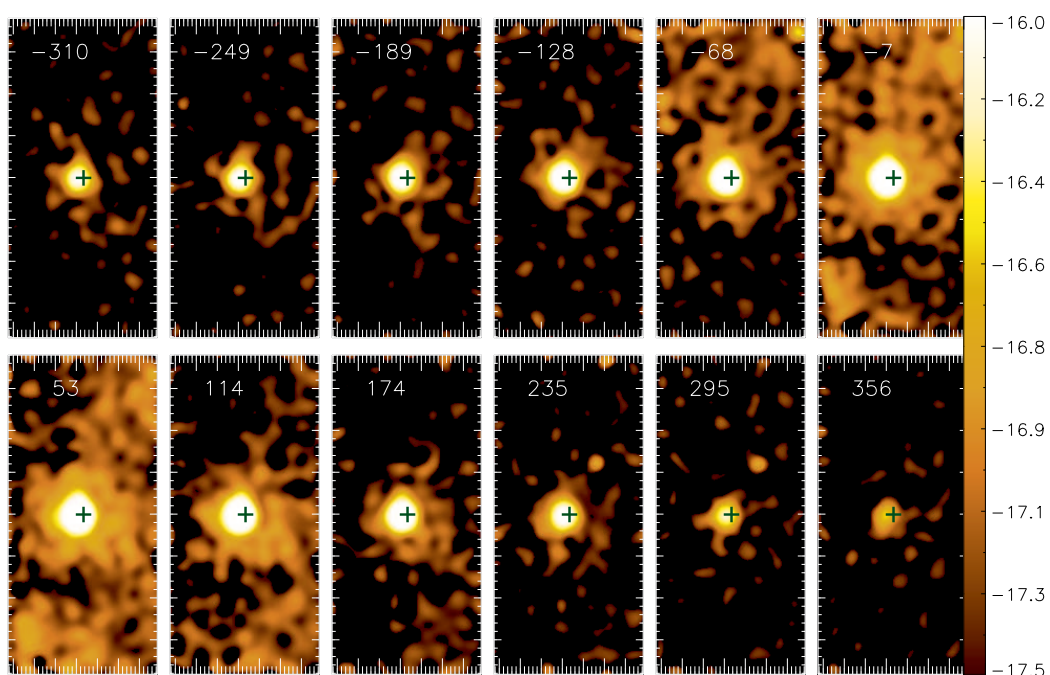


Figura 4.22: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do [S II] λ 6716 Å. O valor da velocidade está na parte superior de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

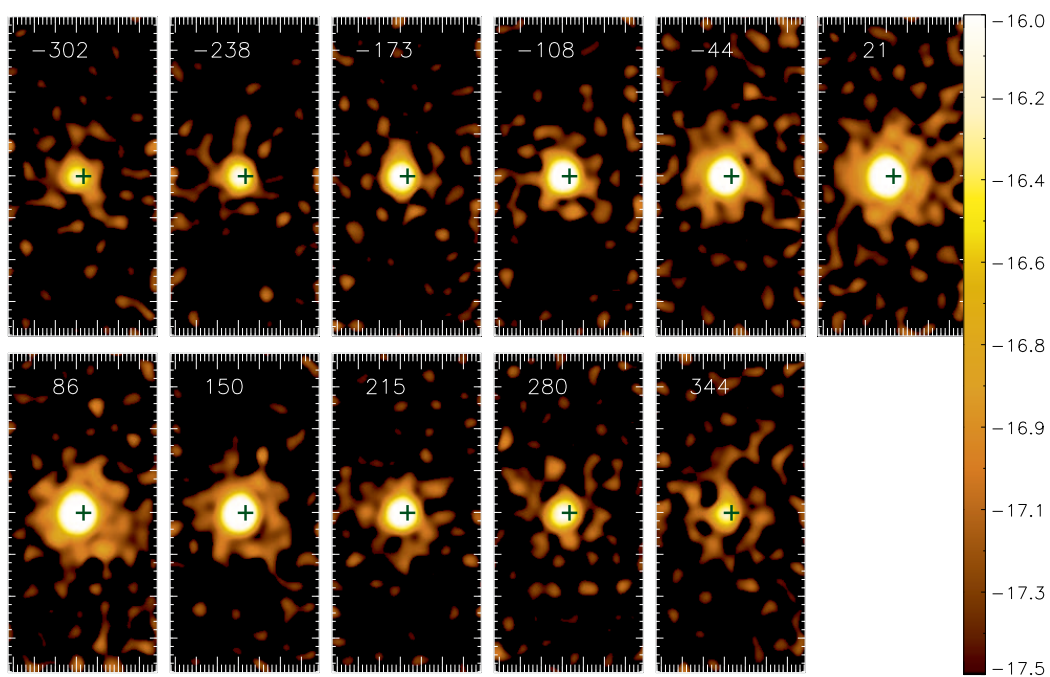


Figura 4.23: *Channel maps* ao longo do perfil da linha do [O I] λ 6300 Å. O valor da velocidade está na parte superior de cada painel, em unidades de km s^{-1} . A barra de cores mostra o fluxo em unidades logarítmicas.

Capítulo 5

Discussões

5.1 Discussões: NGC4501

5.1.1 Cinemática do gás

O campo de velocidade é similar para todas as linhas de emissão do gás, dominado por rotação no plano da galáxia, com excessos de *blueshifts* e *redshifts* ao longo do eixo maior (figura 4.6), que podem estar associados a escoamentos de gás em direção ao centro. Tal gás pode ser o combustível do buraco negro central. Observações interferométricas de alta resolução nos 5 kpc centrais mostram que a dinâmica do ^{12}CO é compatível com a presença de escoamentos de gás em direção ao centro, assim Onodera et al. (2004) concluíram que choques de gás em braços espirais e/ou barras são mecanismos possíveis para transportar matéria em direção ao núcleo e alimentar o buraco negro.

Assumindo que a galáxia é do tipo *trailing*, ou seja, os braços espirais apresentam um enrolamento similar ao esperado se eles fossem produzidos devido a rotação diferencial da galáxia e combinando essa suposição com o campo de velocidades observado, concluímos que os lados próximo e distantes do disco da galáxia estão a noroeste e a sudeste do núcleo, respectivamente.

Como já observado, o campo de velocidade do gás apresenta um padrão de rotação porém observa-se desvios de rotação em alguns locais, assim como observados por Onodera et al. (2004), esses desvios poderão ser analisados através do mapa de resíduo resultante do ajuste do modelo cinemático.

5.1.2 Modelo cinemático

Ajustamos um modelo de rotação, como comentado na seção 3.7, para a linha do $[\text{N II}] \lambda 6583 \text{ \AA}$, apresentado na figura 5.1. O campo de velocidades foi ajustado a partir da Eq. 3.2, onde mantivemos fixos o centro cinemático X_0 e Y_0 .

Na figura 5.1, o painel esquerdo mostra o mapa de velocidades para $[\text{N II}]$, o painel central corresponde ao modelo de rotação ajustado e no painel da direita temos o mapa de resíduos, os quais foram obtidos a partir da subtração do modelo cinemático do campo de velocidade do $[\text{N II}]$. Observa-se

que estes resíduos são co-espaciais com as estruturas de poeira. Para o sul do núcleo, em distâncias semelhantes, observam-se resíduos em blueshifts associados ao braço espiral de poeira.

Como os resíduos em redshifts ocorrem no lado próximo do disco e os resíduos em blueshifts são vistos no lado distante, eles podem ser interpretados como escoamentos de gás em direção ao núcleo, com a suposição de que os mesmos estão no plano da galáxia. Entretanto, vale ressaltar que resíduos de ordem semelhante são observados em outras regiões do campo, o que sugere que a cinemática do gás é mais complexa.

Tabela 5.1: Parâmetros físicos de saída ajustados pelo modelo de rotação para NGC 4501

$$\begin{aligned} A &= 280.93 \pm 18.22 \text{ km s}^{-1}, \\ v_s &= 2169.3849 \pm 0.24 \text{ km s}^{-1}, \\ \Psi_0 &= -82.65^\circ \pm 0.22^\circ, \\ c_o &= 2.27 \pm 0.09'', \\ i &= 48.73^\circ \pm 0.62^\circ, \\ p &= 1.49 \pm 0.03. \end{aligned}$$

Os valores de p foram limitados entre $1 \leq p \leq 3/2$, o melhor ajuste resulta em $p=3/2$ o que equivale a um potencial de massa central finita.

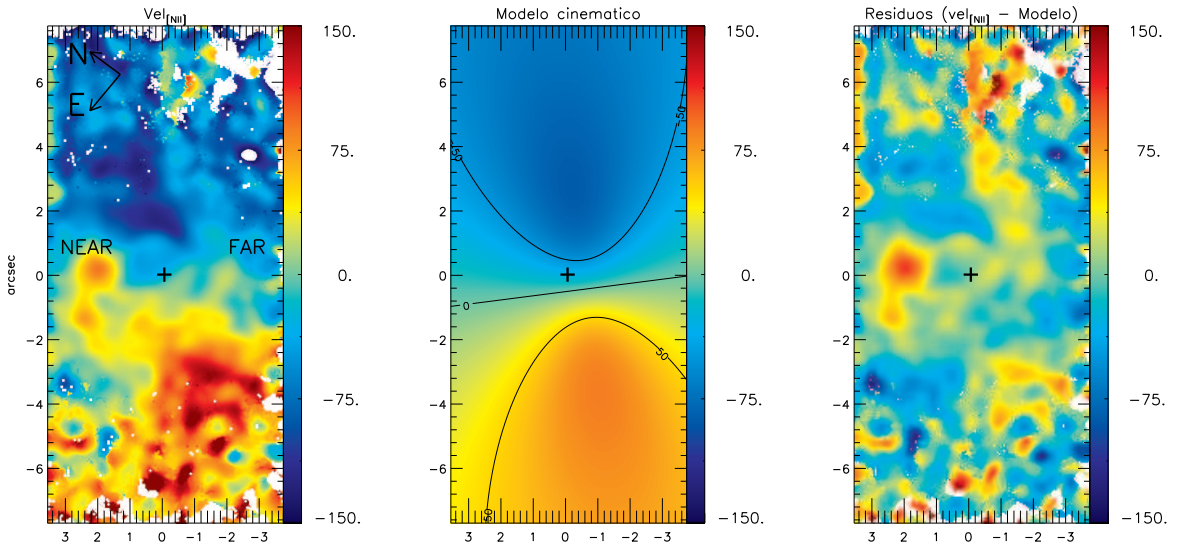


Figura 5.1: No painel a esquerda temos o campo de velocidades em unidades de km s^{-1} . No painel central, o modelo cinemático e no painel a direita o mapa de resíduos.

Na figura 5.2, o painel esquerdo mostra o campo de velocidades para a linha de [N II], no painel central, apresentamos o mapa de estruturas com círculos pretos sinalizando filamentos de poeira, e

no painel da direita, o mapa de resíduos construído a partir da subtração do campo de velocidades do [N II] com o modelo cinemático.

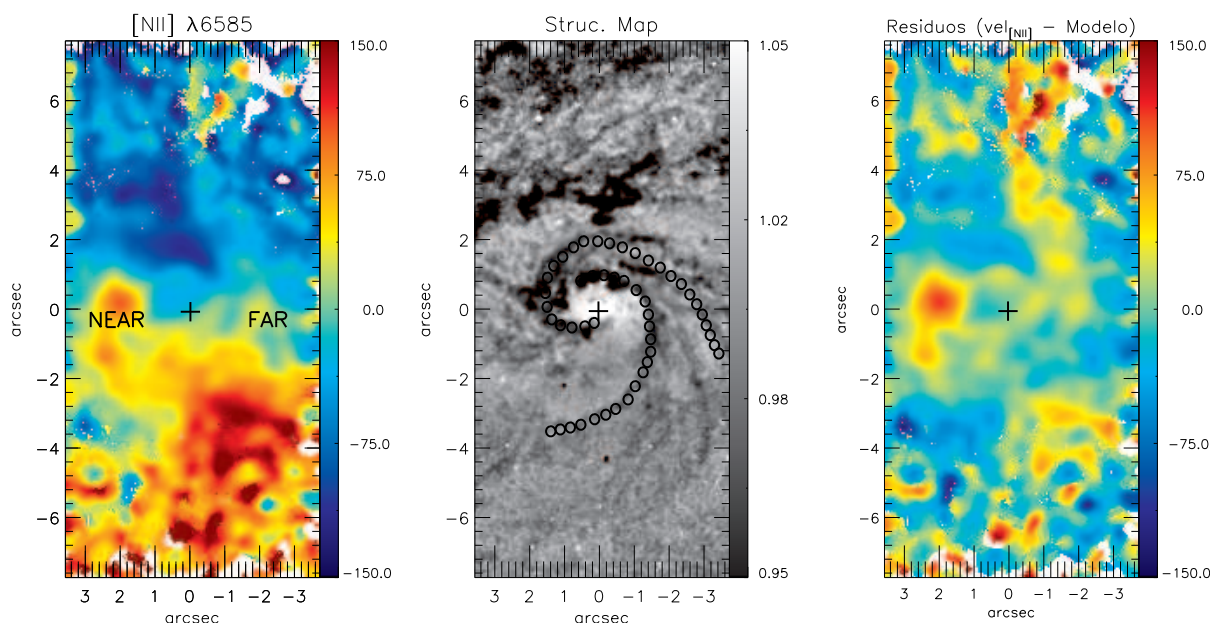


Figura 5.2: O painel da esquerda mostra o campo de velocidade para a linha de [N II] em km s^{-1} , o painel central mostra o mapa de estruturas, onde os círculos pretos sinalizam filamentos de poeira e o painel da direita mostra o mapa de resíduos (km s^{-1}) construído subtraindo o campo de velocidades do [N II] do modelo cinemático.

5.1.3 Excitação do Gás

Baldwin et al. (1981) mostraram que é possível distinguir classes de objetos analisando a razão entre certas intensidades de linhas de emissão, através de construções gráficas chamadas de diagramas de diagnósticos ou diagrama BPT (devido as iniciais dos nomes dos autores). Cada um destes envolve duas razões entre pares das intensidades das linhas de emissão influenciadas por características do nível de ionização de cada objeto. Os pares de linhas utilizados foram [N II] λ 6583/H α , [O III]/H β . Na figura 5.3 apresenta-se um mapa para da razão [N II]/H α . Observa-se valores entre 1 e 10 para esta razão, com os menores valores observados no núcleo e os maiores valores observados a nordeste do núcleo em uma região de tamanho de $1''$ a uma distancia de $1''$. Esta razão pode ser utilizada para estudar a excitação do gás. Em regiões H II, onde o gás é fotoionizado por estrelas quentes esta razão é tipicamente < 0.4 , enquanto que para AGNs onde o campo de radiação é mais intenso e choques entre partículas são mais importantes, observam-se valores maiores (Storchi-Bergmann et al., 2007). A figura 5.3 indica que a contribuição de choques é mais importante para nordeste, onde os valores

atingem $[N II]/H\alpha \approx 10$.

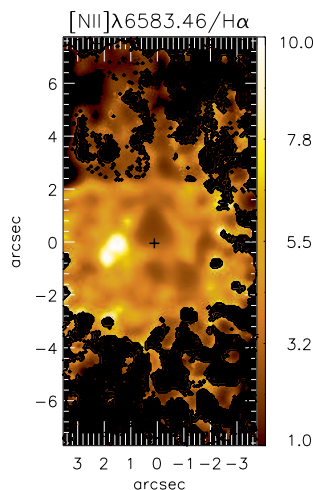


Figura 5.3: Mapa da razão entre as linhas de emissão de $[N II]/H\alpha$

Diagrama de diagnóstico tradicionais exigem a avaliação de pelo menos quatro linha de emissão, no caso do BPT, $[O III]/H\beta$ por $[N II]/H\alpha$, na ausência de alguma dessas linhas é possível usar um diagrama de diagnóstico alternativo proposto por Cid Fernandes et al. (2010), o qual mantém o eixo horizontal $[N II]/H\alpha$ mas substitui $H\beta$ por uma linha mais forte ($H\alpha$ ou $[O II]$) ou substitui $[O III]/H\beta$ pela largura equivalente de $H\alpha$ ($W_{H\alpha}$) (Cid Fernandes et al., 2011). Na figura 5.9 apresentamos o diagrama WHAN Cid Fernandes et al. (2010) que podem ser usados para diferenciar objetos do tipo Starbusts, Seyferts, AGNs fracos (LINERs) e falsos AGNs (fake AGNs).

Esses diagramas foram propostos para espectros nucleares a partir do Sloan Sky Survey. Os maiores valores são típicos de AGNs fracos, consistentes com a figura 4.1, onde observa-se assinatura típica de LINER, embora apresente valores em todas as classes. O triângulo em vermelho sinaliza a posição do núcleo, o qual está caracterizado como um AGN fraco.

5.1.4 Densidade Eletrônica

Na figura 5.5 apresentamos o mapa de densidade eletrônica obtido a partir das linhas de $[S II]$, com temperatura assumida de 10000 K. Observa-se valores próximos a 100 cm^{-3} no núcleo e fora do núcleo um disco de alta densidade com valores chegando a 1000 cm^{-3} . Esses valores são típicos de galáxias ativas semelhantes aos encontrados na literatura usando a mesma técnica (Müller et al., 2012; Schnorr Müller et al., 2011).

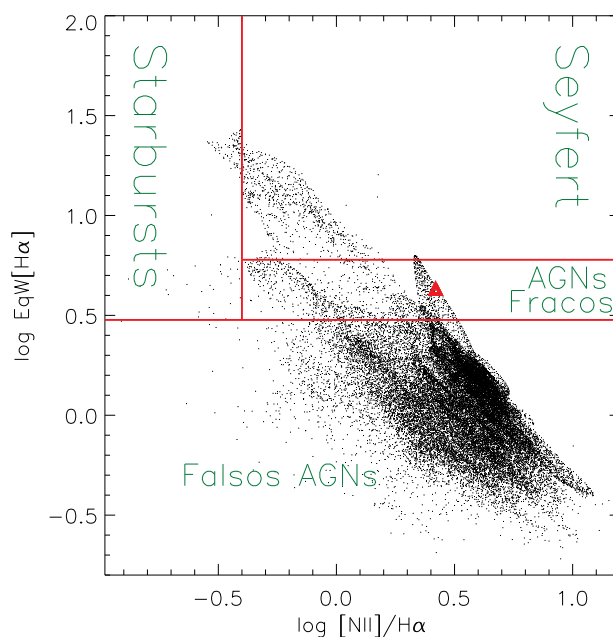


Figura 5.4: Diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2010) usado para diferenciar valores típicos de diferentes classes de objetos.

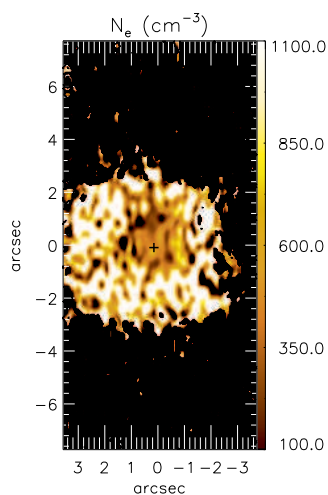


Figura 5.5: Mapa de densidade eletrônica a partir da razão das linhas de enxofre.

5.1.5 Cinemática estelar

O campo de velocidades estelar é dominado por rotação, com uma amplitude de velocidade de 90 km s^{-1} com o lado sudeste se afastando de nós e o lado noroeste se aproximando. Embora o campo de velocidade estelar seja bastante ruído, observa-se claramente que possui um comporta-

mento similar aos campos de velocidades do gás (figura 4.6).

O mapa de dispersão de velocidade das estrelas apresenta valores variando entre 80 e 180 km s^{-1} , com os menores valores vistos a noroeste do núcleo. Comparamos o valor médio que obtivemos, de $\sigma_* = 150 \pm 30 \text{ km s}^{-1}$, com os valores prévios da literatura, que são da ordem de $\sigma_* = 160 \pm 13 \text{ km s}^{-1}$ (Ho, 2009).

5.1.6 Estimativa da massa do buraco negro supermassivo

A massa do buraco negro central pode ser estimada usando a relação $M - \sigma$ (Graham et al. (2011), Gebhardt et al. (2000) e Ferrarese e Merritt (2000))

$$\log(M_\bullet/M_\odot) = (8.13 \pm 0.05) + (5.13 \pm 0.34) \log[\sigma_*/200 \text{ km s}^{-1}], \quad (5.1)$$

onde M_\bullet corresponde à massa do buraco negro e σ_* é a dispersão de velocidades estelar do bojo.

Usando o valor de σ_* obtido por nós, encontramos que o buraco negro no centro de NCG 4501 possui uma massa de, $M_{BH} = 3_{-2}^{+5} \times 10^7 M_\odot$, representando um buraco negro de tamanho intermediário. Mazzalay et al. (2013) estimaram a massa do buraco negro supermassivo para esta galáxia a partir de modelo da dinâmica das estrelas seguindo o método descrito por Nowak et al. (2007), que se baseia na Código superposição de Schwarzschild de Thomas et al. (2004) correspondendo a $M_{BH} = 2.7 \times 10^7 M_\odot$. Nosso valor está de acordo com o obtido por Mazzalay et al. (2013).

5.2 Discussões: NGC 3982

A galáxia NGC 3982 foi classificada, por alguns autores, como Seyfert intermediária (Sy 1.9) (Quillen et al. (2001), Ho et al. (1997) e Véron-Cetty e Véron (2006)). Em análise do espectro nuclear (ver Figura 4.14) podemos comprovar, como Trippe et al. (2010), que esta galáxia apresenta atividade nuclear do tipo 2, pois, há somente componente estreita no perfil das linhas de $\text{H}\alpha$.

5.2.1 Cinemática do gás

Esta galáxia apresenta um anel de formação estelar evidenciado pelas áreas de maior emissão $\text{H}\alpha$, localizado entre $4'' - 6''$ ao redor do núcleo, (ver figura 4.17), assim como publicado em Comerón et al. (2010) e de Vaucouleurs e Buta (1980).

Todos os campos de velocidades, como visto na figura 4.18, sugerem um padrão de rotação, o lado leste da galáxia, se afasta de nós e o lado oeste se aproxima. A partir da hipótese usual de que os braços espirais seguem a rotação da galáxia, conclui-se que o lado próximo da galáxia é o lado leste e o lado distante é o lado oeste (NEAR e FAR, respectivamente).

5.2.2 Modelo cinemático

Como já discutido anteriormente, ajustamos um modelo de rotação ao campo de velocidade para a linha de emissão de [N II] λ 6583 Å, usando a equação 3.2, representado na figura 5.6. No painel esquerdo apresentamos o mapa de velocidade para a linha de [N II], o painel central corresponde ao modelo de rotação ajustado e o painel direito apresentamos o mapa de resíduos.

Tabela 5.2: Parâmetros físicos de saída ajustados pelo modelo de rotação para NGC 3982

$$\begin{aligned} A &= 422.16 \pm 6.07 \text{ km s}^{-1} \\ v_s &= 1099.99 \pm 0.07 \text{ km s}^{-1}, \\ \Psi_0 &= -56.69^\circ \pm 0.24^\circ, \\ c_o &= 8.71 \pm 0.15'', \\ i &= 70.62^\circ \pm 0.27^\circ. \end{aligned}$$

O valor de p foi fixado em $3/2$, o que equivale a um potencial de massa central finita. A velocidade sistêmica está de acordo com a encontrada no *NED* ($V_s = 1109 \text{ km s}^{-1}$), com uma correção heliocêntrica de 15.22 km s^{-1} .

Em relação a orientação do eixo maior (linha dos nodos) da galáxia, há grande divergência na literatura, encontramos o eixo maior orientado ao longo de um ângulo de posição $\approx 93.25^\circ$, Ciesla et al. (2014), com observações no infravermelho médio de $8\mu\text{m}$ e $500\mu\text{m}$, para as quais o eixo maior está orientado ao longo de um ângulo de posição de $\approx 138^\circ$, enquanto que Martinsson et al. (2013a), encontraram 191.6° com observações realizadas com um campo de visão de $64'' \times 74''$. Essa divergência está associada ao tamanho do campo observado e provavelmente o disco seja empenado.

Na figura 5.7, o painel esquerdo mostra o campo de velocidades para a linha de [N II], no painel central, apresentamos o mapa de estruturas com círculos pretos sinalizando filamentos de poeira, e no painel da direita, o mapa de resíduos construído a partir da subtração do campo de velocidades do [N II] com o modelo cinemático.

No mapa de resíduos observa-se excessos de redshifts no lado próximo da galáxia associados ao braço espirais, os quais sugerem estar associados a *inflows* de gás em direção ao núcleo.

No lado distante aparecem resíduos ligeiramente negativos, associados a estruturas de poeira, os quais também poderiam ser interpretados como uma evidência de escoamento de gás em direção ao centro.

5.2.3 Excitação do Gás

Como já comentado na seção 5.1.3, na figura 5.8 apresentamos um mapa para a razão [N II]/H α para a galáxia NGC 3982. Os maiores valores estão a leste do núcleo, chegando a 5, e apresenta anel ao redor do núcleo.

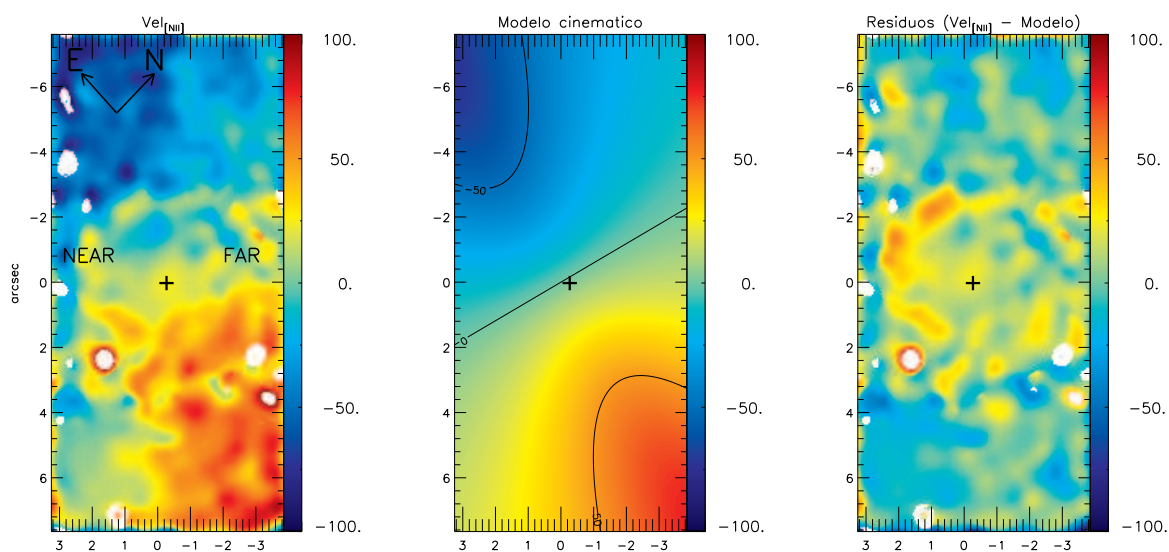


Figura 5.6: No painel esquerdo temos o campo de velocidade do [N II] em unidade de km s^{-1} . No painel central, o modelo cinemático e no painel direito, o mapa de resíduos.

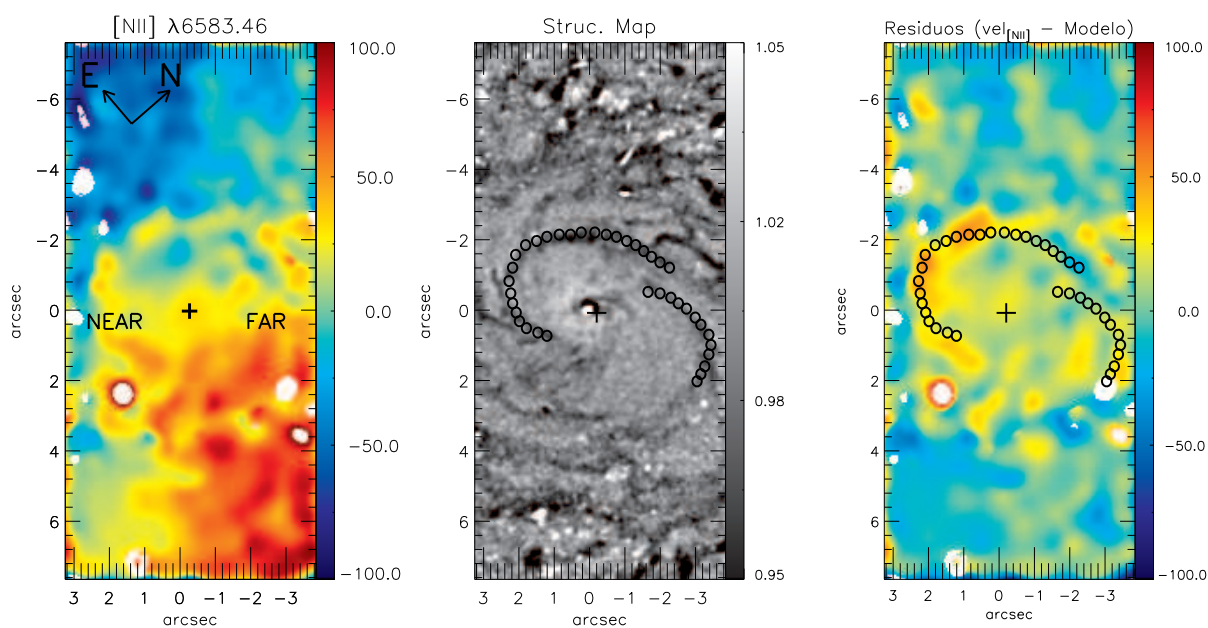


Figura 5.7: O painel da esquerda mostra o campo de velocidade para a linha de [N II] em km s^{-1} , o painel central mostra o mapa de estruturas, onde os círculos pretos sinalizam filamentos de poeira e o painel da direita mostra o mapa de resíduos (km s^{-1}) construído subtraindo o campo de velocidades do [N II] do modelo cinemático.

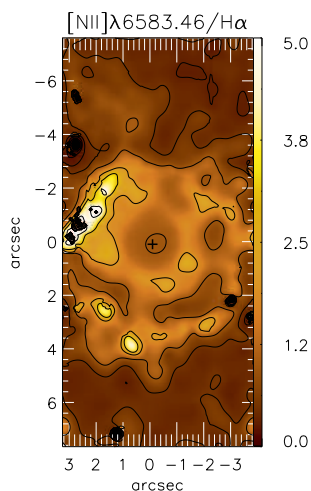


Figura 5.8: Mapa da razão entre as linhas de emissão de $[N II]/H\alpha$

Na figura 5.9 apresentamos o diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2010). Observa-se valores

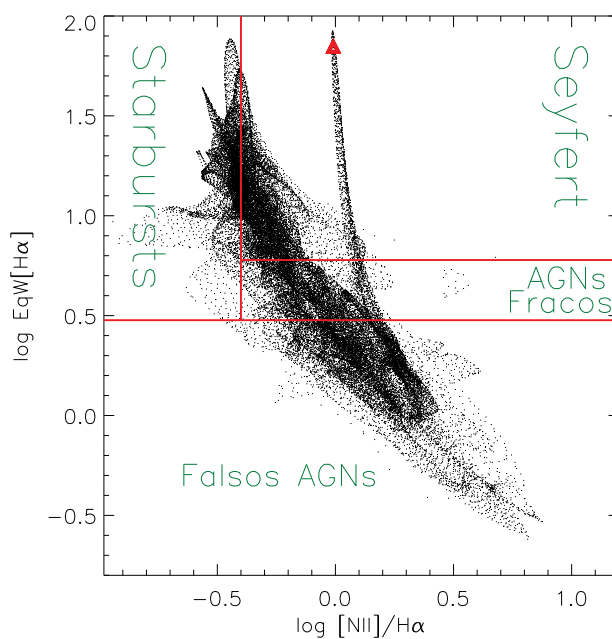


Figura 5.9: Diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2010) usado para diferenciar valores típicos de diferentes classes de objetos.

característicos em todas as classes, o anel de formação estelar presente na linha de emissão de $H\alpha$ visto na figura 4.17 caracteriza os valores de Starbursts, como esperado. O triângulo em vermelho sinaliza a posição nuclear correspondendo a um núcleo Sy.

5.2.4 Densidade Eletrônica

A densidade eletrônica para a galáxia NCG 3982, assim como para a NGC 4501, foi determinada a partir da razão das linhas de enxofre ($[S II] \lambda 6730/\lambda 6716$), usando a tarefa *temden* do pacote *stsdas.nebular* do IRAF, assumindo uma temperatura de 10000 K. No mapa da densidade eletrônica (figura 5.10), observa-se os maiores valores a sudeste do núcleo bem como a oeste deste, com valores chegando a 3000 cm^{-3} .

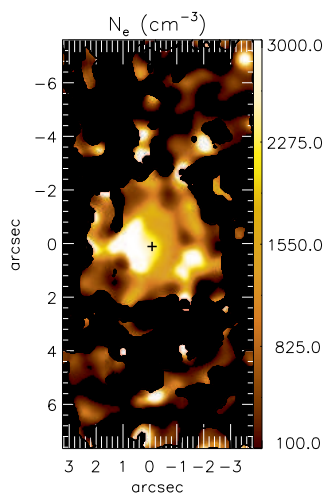


Figura 5.10: Mapa de densidade eletrônica a partir da razão das linhas de enxofre.

Capítulo 6

Considerações finais

6.1 Conclusões

A partir de espectroscopia de campo integral na região ótica do espectro eletromagnético obtido com o instrumento GMOS do telescópio Gemini Norte, realizamos um mapeamento bidimensional da distribuição, ionização, densidade eletrônica e cinemática do gás emissor das principais linhas de emissão presentes na região central das galáxias ativas NGC 4501 e NGC 3982. As observações possuem resoluções espaciais de ≈ 50 pc e ≈ 31 pc para NGC 4501 e NGC 3982, respectivamente. Para a NGC 4501 os dados ainda nos permitiram realizar medidas para a cinemática estelar a partir do ajuste de linhas de absorção presentes no espectro ótico.

Nossas principais conclusões são:

- as seguintes linhas de emissão foram detectadas nos espectros de ambas as galáxias: H α , [N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$, [S II] $\lambda\lambda 6716, 6730$ e [O I] $\lambda 6300$;
- Os campo de velocidades do gás para ambas as galáxias apresenta um padrão de rotação. As velocidades observadas para diferentes linhas de emissão são semelhantes. Os dois objetos possuem um campo de velocidades bem representado por um modelo cinemático para um disco em rotação com órbitas circulares. Para NGC 4501, o modelo cinemático resultou em velocidade sistêmica de ≈ 2170 km $^{-1}$ e ângulo de posição da linha dos nodos de $\approx 100^\circ$. Para NGC 3982, obtivemos velocidade sistêmica de ≈ 1100 km $^{-1}$ e orientação da linha dos nodos de $\approx 125^\circ$;
- O mapa de resíduos de velocidades (campo de velocidades observado - modelo de rotação) mostra resíduos correlacionados com estruturas de poeira, vistas nos mapas de estruturas
- Para NGC 4501 observa-se que os resíduos de velocidade são co-espaciais com as estruturas de poeira, com excessos de *blueshifts* associados ao braço espiral de poeira, no lado próximo e resíduos em *blueshifts* no lado distante, os quais podem ser interpretados como escoamentos de gás em direção ao núcleo da galáxia;

- Para NGC 3982, excessos de *redshifts* são observados em uma estrutura espiral no lado próximo da galáxia, enquanto que no lado distante são observados *blueshifts* associados a estruturas de poeira. Estes resíduos de velocidades podem ser interpretados como *inflows* de gás em direção ao núcleo da galáxia. Entretanto, observou-se também resíduos de velocidade que não estão associados a estruturas de poeira e que não estão relacionando com *inflows* de gás;
- A razão de linhas [N II]/H α apresenta valores que chegam a [N II]/H $\alpha \approx 10$ a nordeste do núcleo para NGC 4501 em um região de tamanho $1''$ a uma distância de $1''$ a nordeste do núcleo. Esta razão sugere choques contribuintes com a excitação de gás nesta região. NGC 3982 apresenta valores de [N II]/H α típicos de galáxias Seyfert em todo o campo observado.
- O mapa de densidade eletrônica para NGC 4501, apresenta valores entre 100 cm^{-3} no núcleo e 900 cm^{-3} em um anel de raio $6''$. Para NCG 3982, os maiores valores foram observados a sudeste e oeste do núcleo, chegando a 3000 cm^{-3} . Estes valores são semelhantes aos observados para a região central de outras galáxias ativas;
- O campo de velocidade estelar de NCG 4501 é dominado por rotação, embora seja bastante ruidoso, apresentando um comportamento similar ao visto para o gás;
- O mapa de dispersão de velocidade das estrelas para NGC 4501, apresenta valores variando de 80 a 180 km s^{-1} , com valor médio de $\sigma_* = 150 \pm 30 \text{ km s}^{-1}$, o que está de acordo com os valores prévios da literatura, que são da ordem de $\sigma_* = 160 \pm 13 \text{ km s}^{-1}$
- A massa do BNS de NGC 4501 foi estimada usando a relação $M_\bullet - \sigma_*$, em $M_{BH} = 3_{-2}^{+5} \times 10^7 M_\odot$, representando um buraco negro de tamanho intermediário;
- Os mapas de dispersão de velocidades do gás, mostram valores variando de 50 a 150 km s^{-1} tanto para NGC 4501 quanto NGC 3982 para as linhas proibidas. Enquanto que H α apresenta valores menores de σ , com $\sigma < 100 \text{ km s}^{-1}$ em todo o campo para NGC 4501 e $\sigma < 120 \text{ km s}^{-1}$ para NGC 3982. Os maiores valores para todas as linhas de emissão são observados a $2\text{-}3''$ a nordeste do núcleo para NGC 4501 e a $1''$ a leste do núcleo para NGC 3982.

6.2 Perspectivas

Pretendemos fazer uma análise mais detalhada da cinemática do gás nas galáxias estudadas neste trabalho e posteriormente, realizar a nossa análise para uma amostra maior de galáxias. Possuímos dados para em torno de uma dezena de galáxias obtidas com o instrumento GMOS, em colaboração com pesquisadores de Rochester Institute of Technology (RIT).

Referências Bibliográficas

- Adams, T. F. A Survey of the Seyfert Galaxies Based on Large-Scale Image-Tube Plates. **Astrophysical Journal Supplement**, v. 33, p. 19, jan. 1977.
- Antonucci, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. **Annual review of astronomy and astrophysics**, v. 31, p. 473–521, 1993.
- Baldwin, A.; Phillips, M. M.; Terlevich, R. Erratum - Classification Parameters for the Emission-Line Spectra of Extragalactic Objects. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 93, p. 817, 1981.
- 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. **Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 371, p. 170–184, set. 2006.
- Bertola, F.; Bettoni, D.; Danziger, J.; Sadler, E.; Sparke, L.; de Zeeuw, T. Testing the gravitational field in elliptical galaxies - NGC 5077. **Astrophysical Journal**, v. 373, p. 369–390, jun. 1991.
- Brum. **Espectroscopia de Campo Integral da região central da Galáxia Ativa NGC 4501 no ótico**. 2013. Dissertação (Graduação) — Curso de Física Bacharelado, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2013.
- Bruzual, G.; Charlot, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 344, p. 1000–1028, out. 2003.
- 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.; Stasińska, G.; Mateus, A.; Vale Asari, N. A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 413, p. 1687–1699, maio 2011.
- Cid Fernandes, R.; Stasińska, G.; Schlickmann, M. S.; Mateus, A.; Vale Asari, N.; Schoenell, W.; Sodré, L. Alternative diagnostic diagrams and the ‘forgotten’ population

- of weak line galaxies in the SDSS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 403, p. 1036–1053, abr. 2010.
- Ciesla, L.; Boquien, M.; Boselli, A.; Buat, V.; Cortese, L.; Bendo, G. J.; Heinis, S.; Galametz, M.; Eales, S.; Smith, M. W. L.; Baes, M.; Bianchi, S.; de Looze, I.; di Serego Alighieri, S.; Galliano, F.; Hughes, T. M.; Madden, S. C.; Pierini, D.; Rémy-Ruyer, A.; Spinoglio, L.; Vaccari, M.; Viaene, S.; Vlahakis, C. Dust spectral energy distributions of nearby galaxies: an insight from the Herschel Reference Survey. **Astronomy Astrophysics**, v. 565, p. A128, maio 2014.
- Comerón, S.; Knapen, J. H.; Beckman, J. E.; Laurikainen, E.; Salo, H.; Martínez-Valpuesta, I.; Buta, R. J. AINUR: Atlas of Images of Nuclear Rings. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 402, p. 2462–2490, mar. 2010.
- Copetti, M. V. F.; Writzl, B. C. Study of electron density in planetary nebulae. A comparison of different density indicators. **Astronomy and Astrophysics**, v. 382, p. 282–290, jan. 2002.
- Couto, G. S.; Storchi-Bergmann, T.; Axon, D. J.; Robinson, A.; Kharb, P.; Riffel, R. A. Kinematics and excitation of the nuclear spiral in the active galaxy Arp 102B. **Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 435, p. 2982–3000, nov. 2013.
- de Vaucouleurs, G.; Buta, R. Diameters of nuclei, lenses, and inner and outer rings in 532 galaxies. **Astronomical Journal**, v. 85, p. 637–648, jun. 1980.
- de Vaucouleurs, G.; de Vaucouleurs, A.; Corwin JR., H. G.; Buta, R. J.; Paturel, G.; Fouqué, P. **Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h . Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h .** [S.l.: s.n.], 1991.
- Emsellem, E.; Cappellari, M.; Peletier, R. F.; McDermid, R. M.; Bacon, R.; Bureau, M.; Copin, Y.; Davies, R. L.; Krajnović, D.; Kuntschner, H.; Miller, B. W.; de Zeeuw, P. T. The SAURON project - III. Integral-field absorption-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 352, p. 721–743, ago. 2004.
- 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.

- 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.
- 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. **Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 412, p. 2211–2228, abr. 2011.
- Ho, L. C. Origin and Dynamical Support of Ionized Gas in Galaxy Bulges. , v. 699, p. 638–648, jul. 2009.
- Ho, L. C.; Filippenko, A. V.; Sargent, W. L. A search for 'dwarf' Seyfert nuclei. 2: an optical spectral atlas of the nuclei of nearby galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 98, p. 477–593, jun. 1995.
- Ho, L. C.; Filippenko, A. V.; Sargent, W. L. W. A Search for "Dwarf" Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 112, p. 315, out. 1997.
- Koopmann, R. A.; Kenney, J. D. P.; Young, J. An Atlas of $H\alpha$ and R Images and Radial Profiles of 63 Bright Virgo Cluster Spiral Galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 135, p. 125–154, ago. 2001.
- Kraemer, S. B.; Schmitt, H. R.; Crenshaw, D. M.; Meléndez, M.; Turner, T. J.; Guainazzi, M.; Mushotzky, R. F. Multi-wavelength Probes of Obscuration Toward the Narrow-line Region in Seyfert Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 727, p. 130, fev. 2011.
- Lucy, L. B. An iterative technique for the rectification of observed distributions. **Astronomical Journal**, v. 79, p. 745, jun. 1974.
- Malkan, M. A.; Gorjian, V.; Tam, R. A Hubble Space Telescope Imaging Survey of Nearby Active Galactic Nuclei. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 117, p. 25–88, jul. 1998.
- Martinsson, T. P. K.; Verheijen, M. A. W.; Westfall, K. B.; Bershadsky, M. A.; Schechtman-Rook, A.; Andersen, D. R.; Swaters, R. A. The DiskMass Survey. VI. Gas and stellar kinematics in spiral galaxies from PPAk integral-field spectroscopy. **Astronomy Astrophysics**, v. 557, p. A130, set. 2013.
- Martinsson, T. P. K.; Verheijen, M. A. W.; Westfall, K. B.; Bershadsky, M. A.; Andersen, D. R.; Swaters, R. A. The DiskMass Survey. VII. The distribution of luminous and dark matter in spiral galaxies. **Astronomy Astrophysics**, v. 557, p. A131, set. 2013.

- 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. **Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 428, p. 2389–2406, jan. 2013.
- Meléndez, M.; Kraemer, S. B.; Schmitt, H. R.; Crenshaw, D. M.; Deo, R. P.; Mushotzky, R. F.; Bruhweiler, F. C. Constraining the Active Galactic Nucleus Contribution in a Multiwavelength Study of Seyfert Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 689, p. 95–107, dez. 2008.
- Menezes, R. B.; Steiner, J. E.; Ricci, T. V. A treatment procedure for Gemini North/NIFS data cubes: application to NGC 4151. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 438, p. 2597–2620, mar. 2014.
- 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.
- Nowak, N.; Saglia, R. P.; Thomas, J.; Bender, R.; Pannella, M.; Gebhardt, K.; Davies, R. I. The supermassive black hole in NGC4486a detected with SINFONI at the Very Large Telescope. **Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 379, p. 909–914, ago. 2007.
- Onodera, S.; Koda, J.; Sofue, Y.; Kohno, K. Gas Dynamics in the Non-barred Seyfert Galaxy NGC 4501. v. 320, p. 271, dez. 2004.
- Osterbrock, D. E. Observational Model of the Ionized Gas in Seyfert and Radio-Galaxy Nuclei. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 75, p. 540–544, fev. 1978.
- Osterbrock, D. E.; Ferland, G. J. **Book-Review - Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei**. 2. ed. CA: University Science Books, 2006.
- Peterson, M. B. Book Review: An introduction to active galactic nuclei / Cambridge U Press, 1997. **The Observatory**, v. 117, p. 314, out. 1997.
- Quillen, A. C.; McDonald, C.; Alonso-Herrero, A.; Lee, A.; Shaked, S.; Rieke, M. J.; Rieke, G. H. The Multitude of Unresolved Continuum Sources at 1.6 Microns in Hubble Space Telescope Images of Seyfert Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 547, p. 129–139, jan. 2001.
- Regan, M. W.; Mulchaey, J. S. Using HUBBLE SPACE TELESCOPE Imaging of Nuclear Dust Morphology to Rule Out Bars Fueling Seyfert Nuclei. **The Astronomical Journal**, v. 117, p. 2676–2694, jun. 1999.

- Richardson, W. H. Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration. **Journal of the Optical Society of America (1917-1983)**, v. 62, p. 55, jan. 1972.
- 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.; Winge, C.; McGregor, P. J.; Beck, T.; Schmitt, H. Mapping of molecular gas inflow towards the Seyfert nucleus of NGC4051 using Gemini NIFS. **Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 385, p. 1129–1142, abr. 2008.
- Sakamoto, K.; Okumura, S. K.; Ishizuki, S.; Scoville, N. Z. Bar-driven Transport of Molecular Gas to Galactic Centers and Its Consequences. **The Astrophysical Journal**, v. 525, p. 691–701, nov. 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.
- Sil'chenko, O. K.; Burenkov, A. N.; Vlasyuk, V. V. Chemically Decoupled Nuclei in the Spiral Galaxies NGC 4216 and NGC 4501. **The Astronomical Journal**, v. 117, p. 826–838, fev. 1999.
- Simões Lopes, R. D.; Storchi-Bergmann, T.; de Fátima Saraiva, M.; Martini, P. A Strong Correlation between Circumnuclear Dust and Black Hole Accretion in Early-Type Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 655, p. 718–734, fev. 2007.
- Storchi-Bergmann, T.; Dors JR., O. L.; 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.
- Thomas, J.; Saglia, R. P.; Bender, R.; Thomas, D.; Gebhardt, K.; Magorrian, J.; Richstone, D. Mapping stationary axisymmetric phase-space distribution functions by orbit libraries. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 353, p. 391–404, set. 2004.
- 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.
- Trippe, M. L.; Crenshaw, D. M.; Deo, R. P.; Dietrich, M.; Kraemer, S. B.; Rafter, S. E.; Turner, T. J. A Multi-wavelength Study of the Nature of Type 1.8/1.9 Seyfert Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 725, p. 1749–1767, dez. 2010.

- 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 Kruit, P. C.; Allen, R. J. The kinematics of spiral and irregular galaxies. **Annual review of astronomy and astrophysics**, v. 16, p. 103–139, 1978.
- 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.
- Véron-Cetty, M.-P.; Véron, P. A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition. **Astronomy and Astrophysics**, v. 455, p. 773–777, ago. 2006.