

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Curso de Física Bacharelado

Espectroscopia de Campo Integral da região central da Galáxia Ativa NGC 4501 no ótico

Carine Brum

Trabalho Final de Graduação realizado
sob orientação do Prof. Dr. Rogemar A.
Riffel e apresentado ao Curso de Física
Bacharelado.

Santa Maria
2013

Espectroscopia de Campo Integral da região central da Galáxia Ativa NGC 4501 no ótico

por

Carine Brum

Trabalho Final de Graduação apresentado ao Curso de Física Bacharelado da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Física**

Orientador: Prof. Dr. Rogemar A. Riffel

Santa Maria, RS, Brasil
2013

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Curso de Física Bacharelado

Espectroscopia de Campo Integral da região central da Galáxia Ativa NGC 4501 no ótico

elaborado por
Carine Brum

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Prof^a. Dra. Débora Regina Roberti, UFSM

Prof. Dr. Alex Fabiano Murillo da Costa, UFSM

Santa Maria, 06 de fevereiro de 2013.

À Cerilo e Vilma, meus amados pais.

Agradecimentos

A caminhada foi dura, muitas vezes dificultosa e cansativa, mas a missão foi cumprida, e o sentimento que prevalece é a satisfação e a alegria desta conquista. Quero agradecer de forma geral a todas as pessoas que me apoiaram, incentivaram e me acompanharam por todos esses anos, em particular;

- à Deus em primeiro lugar;
- à meu orientador Dr. Rogemar A. Riffel pelo incentivo, estímulo, paciência e por todo conhecimento transmitido;
- à todos os professores que contribuíram na transmissão de conhecimento neste período de curso em especial a professora Débora por todo o incentivo, credibilidade, apoio e amizade desde o segundo semestre de minha graduação;
- aos colegas do curso de Física, em especial aos colegas de laboratório;
- à meus pais, Cerilo e Vilma e irmãos Cléber e Jardel, pelo amor, incentivo, apoio, carinho e credibilidade durante todos estes anos;
- à Glória Santos por todo carinho, apoio, estímulo, incentivo e compreensão fundamentais nesta caminhada;
- à minha primeira professora de Física Silvane Piffer, por sempre ter incentivado, acreditado e apostado muito em mim, e pela amizade e carinho;
- ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo

Trabalho Final de Graduação em Física
Curso de Física Bacharelado
Universidade Federal de Santa Maria

Espectroscopia de Campo Integral da região central da Galáxia Ativa NGC 4501 no ótico

AUTOR: CARINE BRUM

ORIENTADOR: ROGEMAR A. RIFFEL

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 06 de fevereiro de 2013

Galáxias com Núcleo Ativo (AGN) são objetos em geral muito luminosos, com um núcleo de aparência estelar que emite grandes quantidades de energia, cuja emissão não pode ser atribuída unicamente a fenômenos de natureza estelar. Os AGNs se dividem em classes diferentes dependendo das larguras das linhas de emissão, luminosidade, intensidade de radiação e emissão rádio. Essas classes são: galáxias Seyferts, LINERs (*Low Ionization Nuclear Emission Region*), rádio galáxias, quasares e blazares. Neste trabalho apresentamos mapas bidimensionais (2D) para a cinemática do gás e cinemática estelar nos 5 kpc centrais da galáxia ativa NCG 4501, bem como para os fluxos das principais linhas de emissão presentes no ótico. As observações foram feitas utilizando a técnica de espectroscopia de campo integral, com o instrumento GMOS do telescópio Gemini Norte de 8m, localizado no Hawai. Os dados observacionais foram reduzidos como parte do presente trabalho e resultados mostram a detecção de várias linhas de emissão. A partir de ajustes das linhas de emissão $H\alpha$, $[N II] \lambda\lambda 6548, 6584$, $[S II] \lambda\lambda 6716, 6731$ e $[O I] \lambda 6302$ por Gaussianas obtivemos campos de velocidades, mapas de fluxos e dispersão de velocidades. Os campos de velocidades do gás são semelhantes para todas as linhas, apresentando um padrão de rotação no plano da galáxia. Através da técnica *pPXF* obtivemos medidas da cinemática estelar a partir de ajustes da absorção do $Na I \lambda 5897$ por templates estelares. O campo de velocidades das estrelas é dominado por rotação, apresentando um comportamento similar ao observado para o campo de velocidades do gás. Com o valor obtido para dispersão de velocidade estelar determinamos a massa do buraco negro, $M_{BH} = 3_{-2}^{+5} \times 10^7 M_{\odot}$.

Palavras - Chave: Espectroscopia de campo integral; cinemática; galáxias ativas; NGC 4501.

Conteúdo

1	Introdução	6
1.1	Galáxias Ativas	6
1.2	Classificação das Galáxias Ativas	7
1.3	Modelo Unificado dos AGNs	9
1.4	Objetivos	11
2	Observação e Redução dos Dados	12
2.1	A galáxia NGC 4501	12
2.2	Revisão bibliográfica	13
2.3	O instrumento GMOS	13
2.4	Observações	14
2.5	Redução dos dados	14
2.5.1	<i>Bias</i>	15
2.5.2	<i>Flat-field</i>	16
2.5.3	<i>Twilight</i>	17
2.5.4	Espectro de uma lâmpada de CuAr	18
2.5.5	Estrela padrão de fluxo	18
2.5.6	Procedimento de Redução de Dados	19
2.5.7	Refração atmosférica diferencial	21
2.5.8	Filtragem Espacial de Butterworth	22
3	Resultados	26
3.0.9	Distribuição de Fluxos	27
3.1	Cinemática do Gás	28
3.2	Excitação do Gás	30
3.3	Densidade Eletrônica	31
3.4	Cinemática Estelar	33

4	Considerações finais	36
4.1	Conclusões	36
4.2	Perspectivas	36

Lista de Figuras

1.1	Representação dos espectros de Galáxias Seyfert do tipo 1 e do tipo 2.	8
1.2	Representação esquemática do modelo unificado dos AGNs	10
2.1	Galáxia NGC 4501	12
2.2	Imagem bias obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.	15
2.3	Imagem <i>flat-field</i> obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.	16
2.4	Imagem <i>twilight</i> obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.	17
2.5	Imagem da lampada padrão (CuAr) obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.	18
2.6	Imagens de contínuo da região interna de NGC 4501 nos comprimentos de onda indicados no topo de cada painel.	22
2.7	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)	23
2.8	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)	24
2.9	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)	25
3.1	Espectro nuclear de NGC 4501 para uma abertura de 0.25 arcsec x 0.25 arcsec com as principais linhas de emissão em $H\alpha$ λ 6563, [N II] $\lambda\lambda$ 6548,6584 e [S II] $\lambda\lambda$ 6716,1731 identificadas.	26
3.2	Espectros de NGC 4501	27
3.3	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	28
3.4	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	29

3.5	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	30
3.6	Mapa da razão entre as linhas de emissão de [N II]/H α	31
3.7	Mapa de densidade eletrônica a partir da razão das linhas de enxofre	32
3.8	Campos de velocidade estelar (esquerda) e mapa de dispersão de velocidade estelar (direita). As barras de cores mostram a escala em kms^{-1}	34

Capítulo 1

Introdução

1.1 Galáxias Ativas

Galáxias com núcleo ativo (*Active Galactic Nuclei* - AGN) são objetos em geral muito luminosos que emitem radiação em todo ou quase todo o espectro eletromagnético. Possuem um núcleo de aparência estelar, emitindo enormes quantidades de energia, cuja emissão nuclear não pode ser atribuída unicamente à efeitos de natureza estelar, ou seja, provenientes de processos não térmicos.

Os AGNs se subdividem em diferentes classes: quasares, galáxias Seyfert, rádio-galáxias, LINERs (*Low Ionization Nuclear Emission-Line Region*) e Blazares, dependendo das larguras das linhas de emissão, luminosidade, intensidade de radiação e emissão rádio. As classes mais luminosas dos AGNs são os quasares e as galáxias Seyfert. A diferença entre essas duas classes, deve-se à quantidade total de energia emitida pela fonte central. No caso das Seyferts a energia total emitida pela fonte nuclear no visível é comparável à energia emitida por todas as estrelas na galáxia ($> 10^{11} L_{\odot}^1$), já os quasares possuem fonte central 100 vezes mais brilhantes que a galáxia hospedeira (Peterson, 1997).

Algumas das características principais dos AGNs são:

- apresentam pequeno tamanho ($< 1 \times 10^{-4} \text{pc}^2$) da fonte de energia e luminosidade alta ($\geq 10^{11} L_{\odot}$) em relação a galáxia hospedeira.
- 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.
- a potência emitida pelos AGNs, exceto os LINERs - por serem AGNs de baixa luminosidade - varia entre $\sim 10^{41}$ a $\sim 10^{46} \text{ ergs}^{-1}$.
- o espectro apresenta linhas de emissão intensas e linhas permitidas muito largas, em alguns casos com larguras $\sim 10.000 \text{ kms}^{-1}$ (medida a meia altura do perfil).

¹ L_{\odot} é definido como a luminosidade solar e corresponde a $8.826 \times 10^{26} \text{ W}$ ou $4.0 \times 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$.

² 1 parsec corresponde a $3.086 \times 10^{16} \text{ m}$.

- a emissão contínua é dominada por processos de natureza não estelar e bem representada por uma lei de potência.
- rápida variabilidade do fluxo contínuo e das linhas de emissão.

1.2 Classificação das Galáxias Ativas

1. **Galáxias Seyfert:** Em 1908, Fath ao estudar o espectro da galáxia NGC 1068, encontrou fortes linhas de emissão, conhecidas na época como características de nebulosas planetárias, e em 1943, 35 anos após o registro do primeiro espectro de uma galáxia de núcleo ativo, Carl Seyfert veio a perceber que existiam várias galáxias semelhantes 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 distinguiam 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 intermediafia que varia entre $\sim 10^{42}$ a $\sim 10^{45}$ ergs $^{-1}$. Essas características definem a classe das galáxias Seyfert.

Essa classe de AGNs pode ser dividida em dois tipos, a partir de larguras relativas de suas linhas de emissão: Seyfert 1 (Sy 1) e Seyfert 2 (Sy 2).

Seyfert 1: Esta classe é caracterizada por apresentar duas componentes nas linhas de emissão permitidas, como por exemplo linhas do H I, He I e He II. Uma larga, com larguras de FWHM (*Full Width at Half Maximum*) $\sim 1000 - 10000$ kms $^{-1}$, e outra estreita, com larguras FWHM ~ 500 kms $^{-1}$. A componente estreita possui larguras semelhantes as observadas para as linhas proibidas, por exemplo do [O III], [S II] e [N II]. O protótipo desta classe é a NCG 4151.

Seyfert 2: Já nas Seyfert 2 são observadas somente linhas estreitas. As linhas permitidas são aproximadamente da mesma largura das proibidas, com larguras semelhantes as observadas nas Syfert 1 de ~ 500 kms $^{-1}$.

Na figura 1.1 pode-se observar o espectro ótico das duas classes de galáxias Seyferts, Seyfert 1 e Seyfert 2, com as principais linhas de emissão identificadas. Note a presença dos componentes largos de linhas permitidas nas Sy1 e sua ausência nas Sy2.

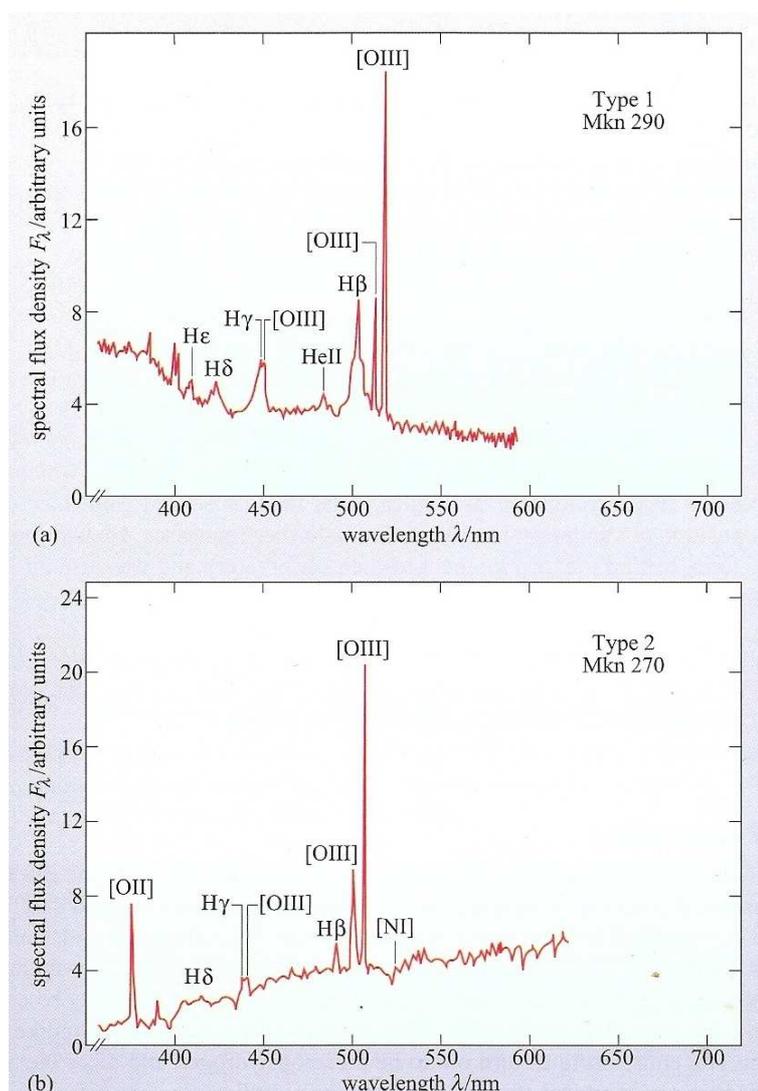


Figura 1.1: Espectro de galáxias Seyfert 1 e 2. Extraída de Jones & Lambourne (2004).

2. **Quasares** (*Quasi-stellar Radio Sources*): Também conhecidos como QSO (*Quasi Stellar Objects*), são objetos extremamente luminosos, cujo núcleo emite até 100 vezes (10^{46} ergs/s) mais energia que todas as estrelas da galáxia hospedeira. Tendo forte emissão em todas as bandas do espectro eletromagnético, ou seja, emite em todos os comprimentos de onda. Todos os quasares apresentam grandes velocidades de afastamento, de no mínimo 6% da velocidade da luz (Neil et.al. 2010), o que implica em grandes distâncias. Muitos apresentam grandes redshifts³ (de até $z \sim 7$), indicando que são objetos muito distantes, e que a luz observada hoje foi emitida quando o universo ainda era jovem.

3. **Rádios Galáxias**: Essa classe de AGNs apresenta forte emissão na banda rádio, tendo como

³o redshift relativístico é dado por $z = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - 1$, onde v é a velocidade de recessão e c a velocidade da luz.

galáxia hospedeira em geral uma gigante elíptica. Outra característica observada nesses AGNs é a presença de uma fonte rádio compacta no núcleo da galáxia emitindo jatos de matéria do centro e nas extremidades, apresenta lóbulos emissores em rádio. Quanto ao espectro ótico as rádio-galáxias podem apresentar dois tipos: as rádio-galáxias de linhas largas (BLRGs) e as rádio-galáxias de linhas estreitas (NLRGs). As BLRGs apresentam tanto linhas largas ($\sim 10.000 \text{ kms}^{-1}$) como linhas estreitas ($\sim 500 \text{ kms}^{-1}$). Já as NLRGs emitem somente linhas estreitas.

4. **LINERs** (*Low Ionization Nuclear Emission Region*): Esta é a classe de mais baixa luminosidade dos AGNs. São galáxias quase normais, nas quais acredita-se que exista em seu centro um buraco negro supermassivo (BNS) em baixa atividade. Espectroscopicamente, se assemelham as galáxias Seyfert 2, exceto por apresentar linhas de baixa ionização, como [O I] $\lambda 6300$ e [N II] $\lambda \lambda 6548, 6583$ intensas. Ocorrem principalmente em galáxias espirais e elípticas pequenas.
5. **Blazares**: Esta classe de AGNs apresenta uma aparência estelar, semelhante aos quasares, mas só foram reconhecidos como uma classe distinta na década de 1970. Possuem núcleo muito brilhante e compacto, e se caracterizam pela variação temporal da emissão em todos os comprimentos de onda, e intensa variação no visível em curtos períodos de tempo, além da tendência a ter polarização elevada. Apresentam um espectro não-térmico, e não apresentam linhas de emissão ou são linhas extremamente fracas. São encontradas em galáxias hospedeiras elípticas. Os blazares são divididos em duas classes: os objetos BL Lac, caracterizados por apresentar linhas de emissão muito fracas e encontram-se em redshifts relativamente baixos ($z = 0,1$), e os OVV (*Optically Violent Variables*), que são semelhantes aos BL Lac, mas apresentam linhas de emissão largas e intensas, com grande variabilidade no ótico, e redshifts grandes.

1.3 Modelo Unificado dos AGNs

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. O modelo mais aceito atualmente foi o proposto originalmente por Osterbrock (1978) para diferenciar Sy 1 e Sy 2 e é conhecido como o Modelo Unificado (ver Antonucci 1993). Uma representação esquemática deste modelo é apresentada na figura 1.2. 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 das linhas largas (BLR), 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 $\sim 1 \text{ kpc}$ 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*). Levando em consideração as galáxias Seyfert 1 e Seyfert 2, pelo 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. E 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 et al. 2003).

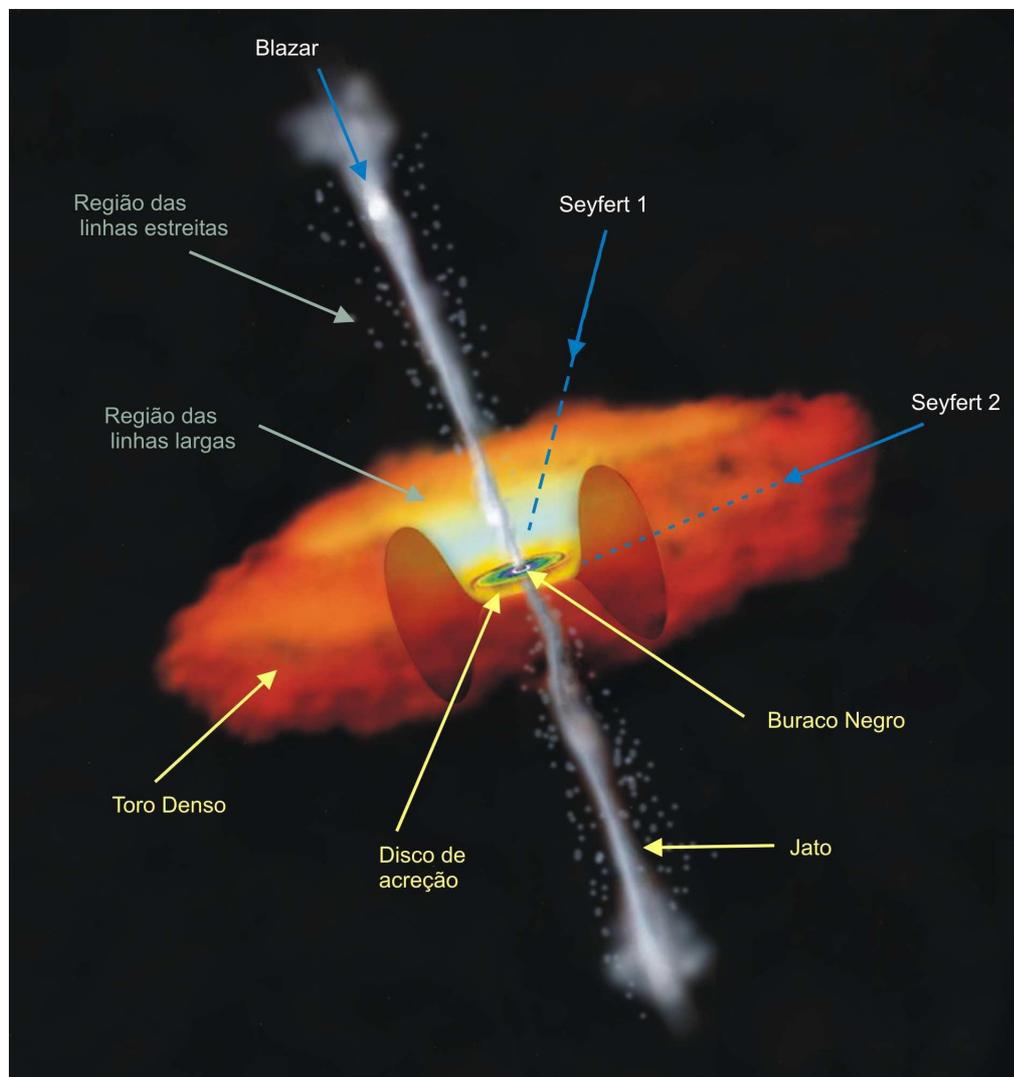


Figura 1.2: Representação esquemática do modelo unificado dos AGNs. Extraído de Diniz (2011)

1.4 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- realizar um mapeamento bidimensional da distribuição, ionização, densidade eletrônica e cinemática do gás na região central da galáxia ativa NGC 4501 utilizando espectroscopia de campo integral na região óptica do espectro eletromagnético com o telescópio Gemini de 8m;
- realizar um mapeamento da cinemática estelar a partir do ajuste de linhas de absorção presentes no espectro ótico de NGC 4501;
- analisar detalhes das redondezas do buraco negro supermassivo presente no centro desta galáxia e propor um cenário físico para esta região.

Este tipo de estudo é raro na literatura e fundamental para o melhor entendimento dos AGNs o que justifica a realização deste trabalho.

Capítulo 2

Observação e Redução dos Dados

2.1 A galáxia NGC 4501

A galáxia NGC 4501 está a uma distância de 17 Mpc (Vollmer et al. 2008), localizada a cerca de 2.0° (0.6 Mpc) a noroeste do centro do aglomerado de Virgem e sua inclinação em relação ao plano do céu é de 56° (Guharthakurta et al. 1988). De acordo com a classificação morfológica de Hubble, é uma galáxia espiral não barrada do tipo (Sb) (RC3, 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.ccvalg.pt/astronomia/galaxias/galaxias_espirais/m88.jpg (16/06/12 - 19:35)

Extraída

2.2 Revisão bibliográfica

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.

No estudo feito por Onodera et al. 2004, realizaram-se observações interferométricas de alta resolução espacial para estudar a dinâmica do gás molecular nos 5 kpc centrais da NGC 4501 na linha ^{12}CO utilizando o telescópio Nobeyama Millimeter Array (NMA). Observou-se que na região central a galáxia tem dois componentes de gás molecular - braços espirais penetrando na região nuclear e uma concentração central com raio de 5'' (~ 390 pc). Os autores estimaram a massa total de gás como sendo $M_{\text{gas}} = 1.3 \times 10^8 M_{\odot}$ a partir da medida do fluxo da linha de ^{12}CO . Os braços espirais são observados a partir da região nuclear até o fim do campo de visão ($r \sim 40''$). O campo de velocidade ao longo desses braços mostram desvios em relação ao movimento circular, isto é, representa movimentos não circulares superpostos numa rotação regular do disco. 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.

Em Vollmer et al. 2008, investigou-se a natureza da interação da NGC 4501 com o ambiente do aglomerado, utilizando dados de HI do VIVA (*VLA Imaging of Virgo galaxies in Atomic gas*), comparado com modelos dinâmicos detalhados. A comparação entre observações e simulações mostra que a NGC 4501 está se aproximando do centro do aglomerado de Virgem, concluindo-se que, a separação por pressão dinâmica pode ser a causa principal desta característica. Assumindo órbitas radiais esta galáxia terá a maior proximidade do núcleo do aglomerado em $\sim 200\text{-}300$ Myr¹.

2.3 O instrumento GMOS

O instrumento utilizado para a aquisição dos dados de espectroscopia de campo integral de NGC 4501 foi o espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*), do telescópio Gemini Norte de 8m, que permite que sejam feitas observações no intervalo espectral de 3600Å até 9400Å, nos modos fenda longa, multi fendas e IFU (Unidade de Campo Integral). Localizado no vulcão adormecido Mauna Kea, a 4220 m de altitude no Hawai. 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.

¹Myr = 10⁶anos

A unidade de campo integral do GMOS fornece a capacidade de realizar espectroscopia de campos resolvidos espacialmente usando arranjos hexagonais de lentes de 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. 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. O espectrógrafo tem dois sistemas óticos, um otimizado para o azul e outro otimizado para o vermelho. 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 o caminho ótico azul, permitindo que o espectrógrafo use somente a metade vermelha do arranjo, assim a cobertura espacial será de $3.5'' \times 5''$ e $1.75'' \times 5''$ nos campos principal e do 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.

2.4 Observações

Neste trabalho utilizamos dados públicos disponíveis no banco de dados do observatório Gemini de observações realizadas no dia 14 de fevereiro de 2008, como o telescópio Gemini Norte para a galáxia NGC 4501, obtidos com o instrumento GMOS no modo IFU operando no modo de duas fendas cobrindo o intervalo espectral de 5600Å a 6900Å , que inclui várias linhas de emissão intensas em galáxias ativas. A rede utilizada foi R400 usando o filtro G5305.

2.5 Redução dos dados

Para redução dos dados usamos uma série de tarefas do pacote GMOS, desenvolvido dentro do pacote GEMINI, ambos criados para rodar dentro do programa de redução de dados astrofísicos IRAF (*Images Reduction And Analysis Facility*), distribuído pelo NOAO (*National Optical Astronomy Observatories*).

Quando se obtém imagens diretas do CCD, estes dados crus possuem defeitos/ruídos, por isso é necessário o processo de redução para que dados científicos possam ser extraídos dos mesmos. Para o processo de redução 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*. 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 arquivos

para imagens *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.

2.5.1 *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 0 segundo, 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.

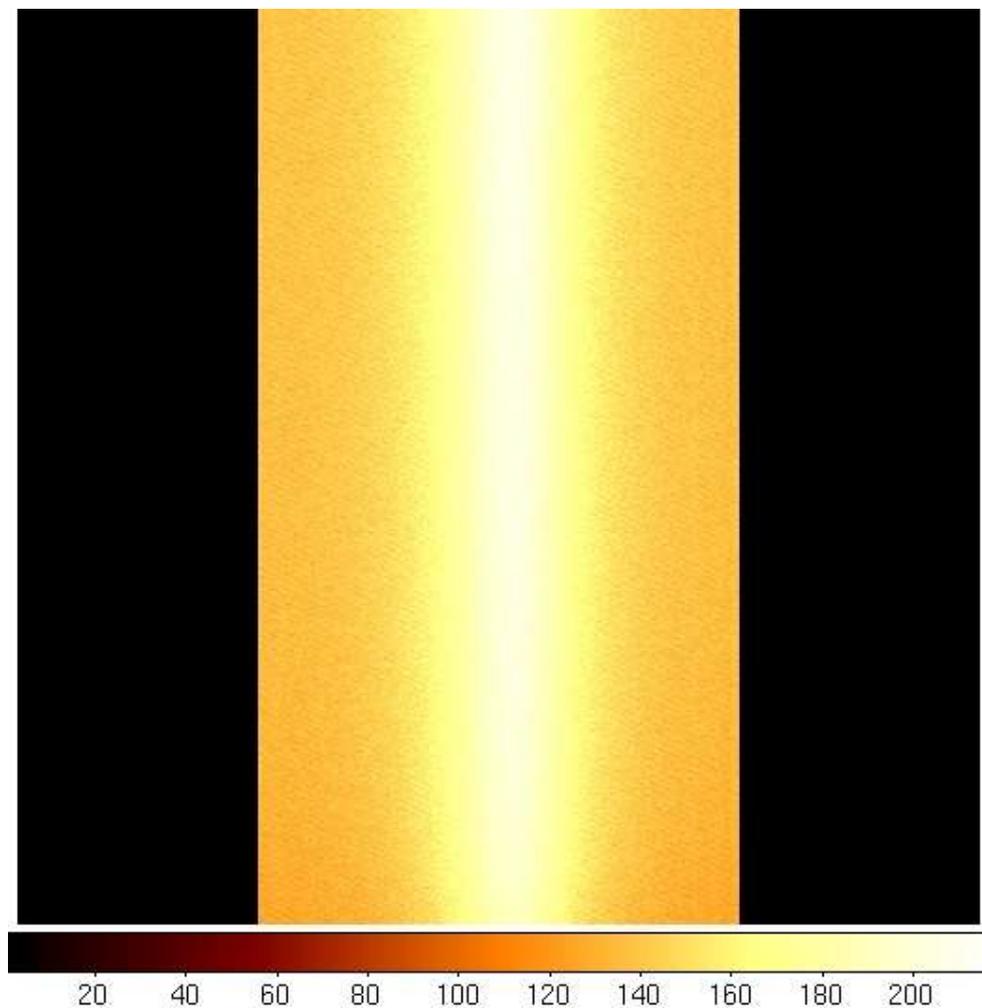


Figura 2.2: Imagem *bias* obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.

2.5.2 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 da 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 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.

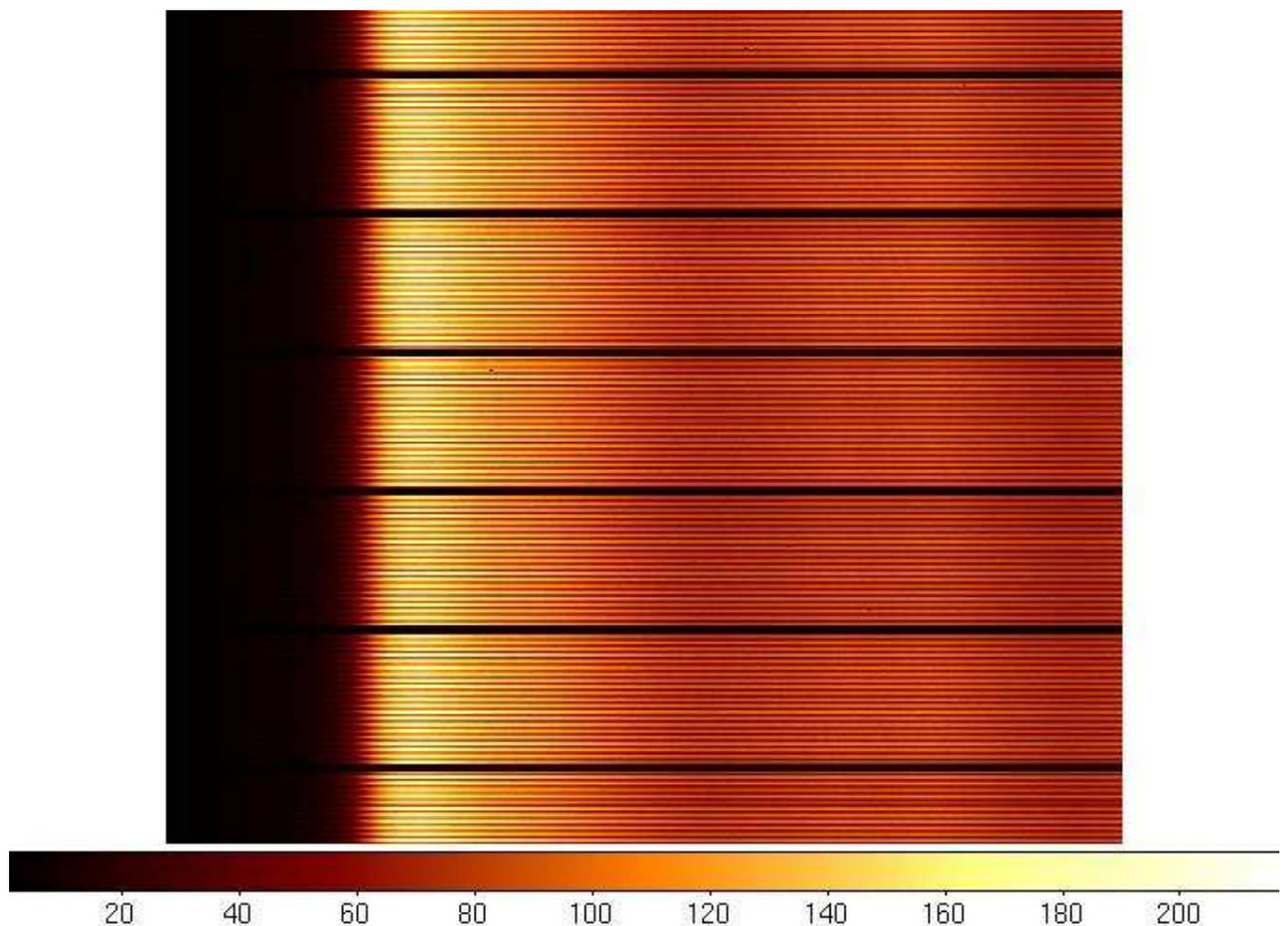


Figura 2.3: Imagem *flat-field* obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.

2.5.3 *Twilight*

O GMOS possui dois caminhos óticos distintos, caminho azul e o caminho vermelho, como apresentado acima 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 correspondentes 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.

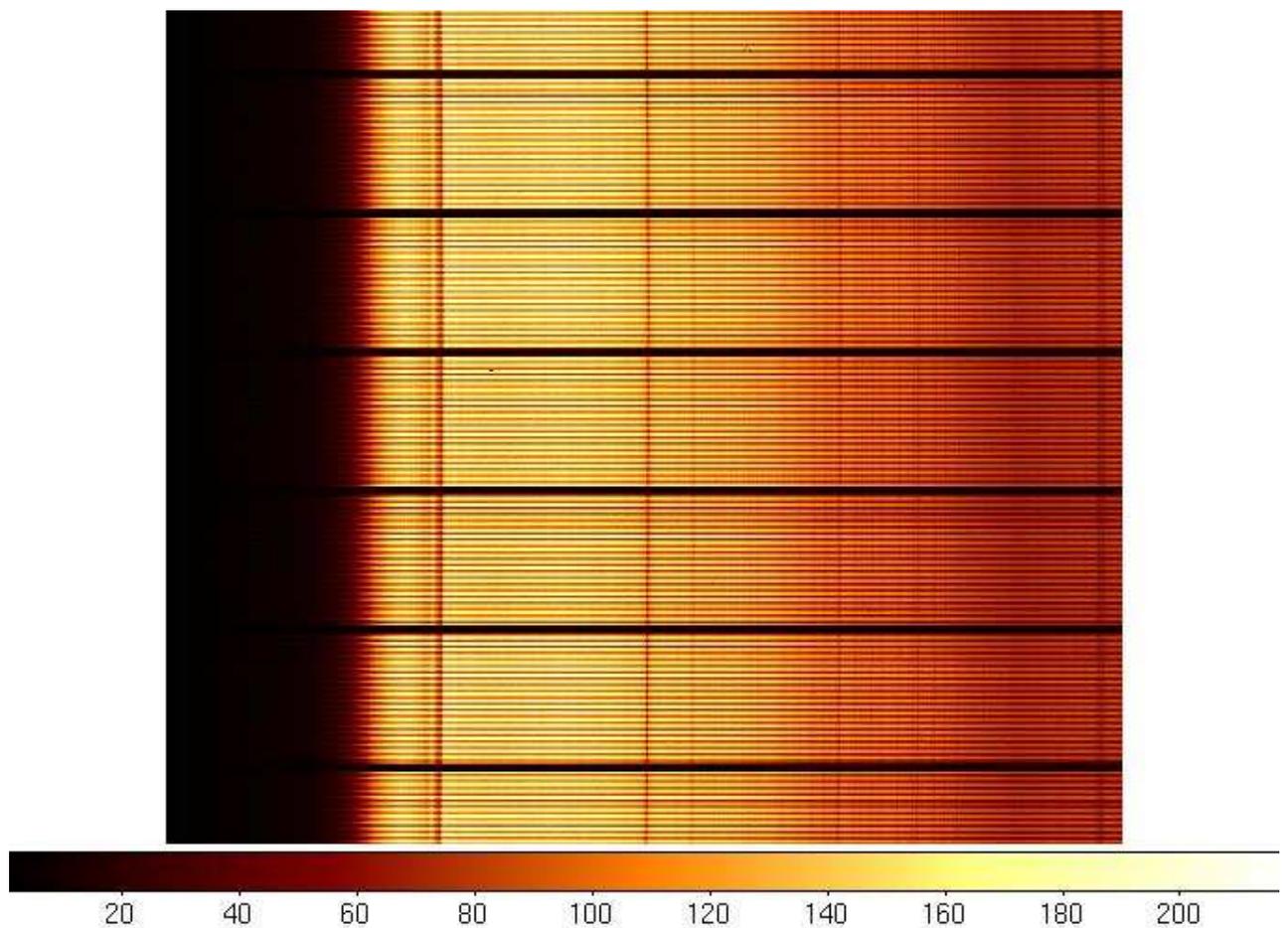


Figura 2.4: Imagem *twilight* obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.

2.5.4 Espectro de uma lâmpada de CuAr

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 ondas espaçadas suficientemente, onde a radiação emitida é formada por comprimentos de onda bem definidos. Na figura 2.5 apresenta-se uma imagem típica da lâmpada de comparação de CuAr obtida com o instrumento GMOS e usada na redução dos dados.

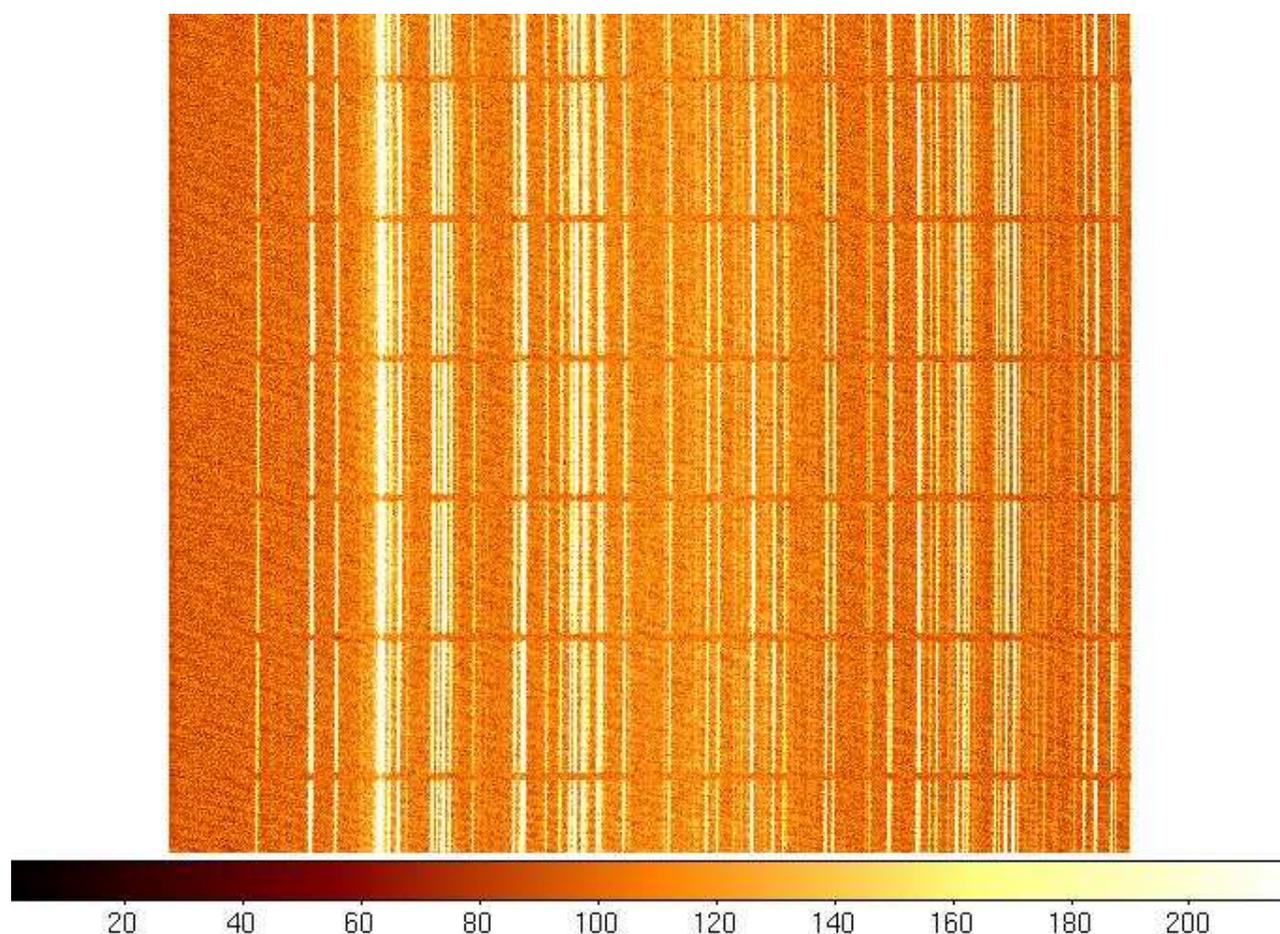


Figura 2.5: Imagem da lâmpada de comparação de CuAr obtida com o instrumento GMOS para o CCD 1.

2.5.5 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.

2.5.6 Procedimento de Redução de Dados

Os principais procedimentos de redução adotados neste trabalho foram:

1. Subtração do *bias*
2. Divisão por *flat-field*
3. Correção das diferenças de respostas fibra a fibra pelo *twilight*
4. Calibração em comprimento de onda
5. Subtração do céu
6. Calibração em fluxo
7. Construção de cubos de dados

A seguir descrevemos as principais tarefas do pacote **gemini.gmos** utilizadas para a redução dos dados de calibração:

1. *gprepare*: coloca informações no header das imagens contendo as coordenadas espaciais de cada fibra. Executado para todos os arquivos.
2. *gfreduce*: aplica-se esta tarefa a determinação do *trim* e subtração do *bias* dos *flat-field* e *twilight*.
3. *gextract*: extrai os espectros unidimensionais.
4. *gfresponse*: faz a curva de resposta usando o *twilight* e o *flat-field*.

A seguir descrevemos as principais tarefas do pacote **gemini.gmos** utilizadas para a redução dos dados da lâmpada de comparação:

1. aplica-se os passos de 1 a 4 anteriores.
2. *gswavelength*: determina os valores corretos para o comprimento de onda das linhas de emissão presentes no espectro da lâmpada de calibração. Esta informação será usada na calibração em comprimento de onda.

A seguir descrevemos as principais tarefas do pacote **gemini.gmos** utilizadas para a redução dos dados da estrela padrão:

1. *gprepare*: o mesmo procedimento aplicado anteriormente.
2. *gfreduce*: aplica-se esta tarefa para fazer a determinação do *trim* e subtração do *bias*.
3. *gextract*: esta tarefa extrai espectros e aplica a correção por *flat-field* e *twilight*.
4. *gfapsum*: com esta tarefa, soma-se todos os espectros da estrela padrão.
5. *gscombine*: esta tarefa combina todos os espectros da estrela.
6. *gsstandard*: usada para determinar uma curva de sensibilidade, usada na calibração em fluxo.

A seguir descrevemos as principais tarefas do pacote **gemini.gmos** utilizadas para a redução dos dados da galáxia:

1. *gprepare*: o mesmo procedimento aplicado anteriormente.
2. *gfreduce*: aplica-se para a determinação do *trim*, subtrair o *bias* e aplicar o mapa de resposta (obtido na etapa 4 da redução das calibrações) nos dados para a galáxia.
3. *gtransform*: aplica a calibração em comprimento de onda usando a tabela criada na etapa 2 da redução da lâmpada de comparação..
4. *gfreduce*: subtração da emissão de céu da galáxia.
5. *gscalibrate*: aplica a calibração em fluxo na galáxia usando a curva de sensibilidade obtida na etapa 6 da redução da estrela padrão.
6. *gfcube*: cria os cubos de dados da galáxia. Os cubos foram criados com pixels espaciais quadrados de lado 0.05".
7. *gemcombine*: usado para combinar todos os cubos individuais em um único cubo: o cubo final.

É importante ressaltar que a tarefa *gfreduce* foi utilizada várias vezes durante o processo de redução, aplicando diferentes passos. Trata-se de uma tarefa geral que pode chamar outras tarefas do pacote GMOS para executar a redução.

2.5.7 Refração atmosférica diferencial

As camadas de ar que envolvem a Terra têm índices de refração diferentes, assim, quando a luz emitida de um objeto celeste penetrar a atmosfera sofre um desvio devido ao efeito de refração, ou seja, tem sua direção de propagação original alterada, pois o raio luminoso passou de um meio de densidade nula (o vácuo do espaço) para um meio com uma certa densidade, provoca um deslocamento aparente dos astros, o que pode afetar significativamente as observações realizadas a partir da superfície terrestre.

Seja z a distância zenital de um objeto celeste. Partindo da Lei de Snell na superfície divisória entre o vácuo e a camada atmosférica mais elevada, tem-se

$$\mu \operatorname{sen}(z) = \mu_n \operatorname{sen}(z)'_n,$$

onde μ é o índice de refração atmosférica, $\mu_n = 1$ é o índice de refração do vácuo e z' a distância zenital observada. A refração média $R = z - z'$ pode ser dada em segundos de arco por

$$R = 206265(\mu_0 - 1)\tan(z)'$$

sendo μ_0 o índice de refração próximo à superfície da Terra (Menezes, 2012).

Comprimentos de onda diferentes sofrem refração diferente, o índice de refração μ_0 possui uma dependência em relação à comprimentos de onda variando quando o comprimento de onda varia de λ_1 e λ_2 (com z' constante)

$$\Delta R = R(\lambda_2) - R(\lambda_1)$$

$$\Delta R = 206262[\mu_0(\lambda_2) - \mu_0(\lambda_1)]\tan(z)'$$

Durante uma observação de um determinado objeto celeste o comprimento de onda é um parâmetro variável. Outros parâmetros como a temperatura e pressão, em um tempo de exposição não muito longo, pode-se assumir que são constantes. Em um cubo de dados o comprimento de onda é um parâmetro variável, já que a imagem do objeto pode ser vista em diferentes regiões espectrais. Devido à dependência de ΔR para com o comprimento de onda, conclui-se que, o ângulo de refração atmosférica varia ao longo de um cubo de dados, dando origem à chamada refração atmosférica diferencial. Esse efeito faz com que a posição de um objeto no cubo de dados mude conforme se observam imagens dele em diferentes comprimentos de onda (Menezes, 2012).

Recentemente foi implementado um algoritmo de correção da refração atmosférica diferencial dentro da tarefa *gfcube*, usada para criar os cubos de dados. Na figura 2.6 apresenta-se imagens de contínuo, onde identificamos o ângulo de orientação das observações (PA=140°). Utiliza-se imagens de contínuo para verificar se a correção da refração atmosférica diferencial foi eficaz durante a criação dos cubos de dados usando a tarefa *gfcube*. Estas figuras mostram que o pico da emissão contínua

em diferentes comprimentos de onda ocorre no mesmo pixel espacial, evidenciando que a correção pela refração atmosférica diferencial foi bem sucedida. Outra característica observada nestas imagens é que o contínuo em todos os comprimentos de onda é mais alongado na vertical, mostrando que a emissão contínua na região central de NGC 4501 difere da emissão em grande escala, apresentado na Fig. 2.1.

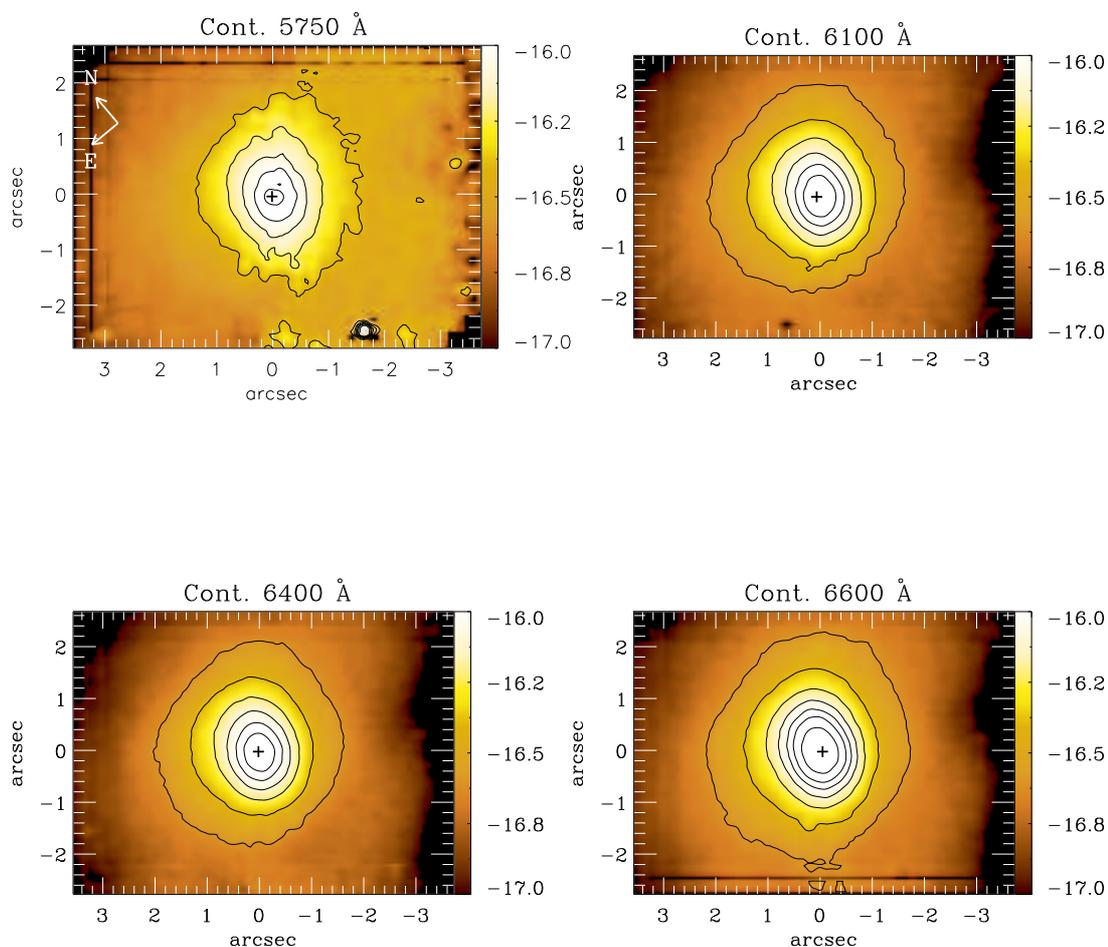


Figura 2.6: Imagens de contínuo da região interna de NGC 4501

2.5.8 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 de 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 deste cubo de dados foi de 0.15 Ny^2 e $n=3$ removendo de forma eficaz o ruído espacial. Na figura 2.7 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, aumentando assim a razão sinal/ruído dos espectros.

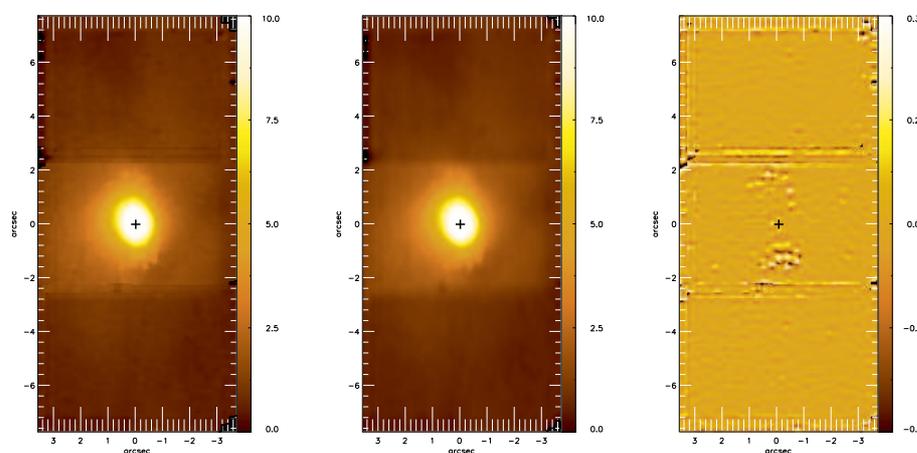


Figura 2.7: Imagem de contínuo do cubo de dados antes da filtragem (esquerda); imagem do contínuo após a filtragem espacial de Butterworth; resíduos correspondentes a diferença entre a imagem original e filtrada (direita), usou-se $n=3$ e frequência de corte de 0.15 Ny . Os fluxos estão mostrados em unidades de $10^{-17} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

²O critério de Nyquist (Ny) 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 $2t$.

Para chegarmos a conclusão de que os parâmetros acima são os mais adequados para o nosso caso, realizamos vários testes com n variando de 1 a 5 e ν variando de 0.1 a 0.5 Ny. Nas figuras 2.7 e 2.8 apresentamos resultados para dois destes testes, para $n = 5$ e $\nu = 0.5$ Ny e $n = 1$ e $\nu = 0.1$ Ny, respectivamente. Observa-se que para o primeiro caso, a remoção de ruído não é eficaz. Por outro lado, no segundo caso (Fig. 2.9) remove-se além de ruído, parte da emissão do núcleo da galáxia, como mostrado pelos altos valores apresentados no mapa de resíduos na região central.

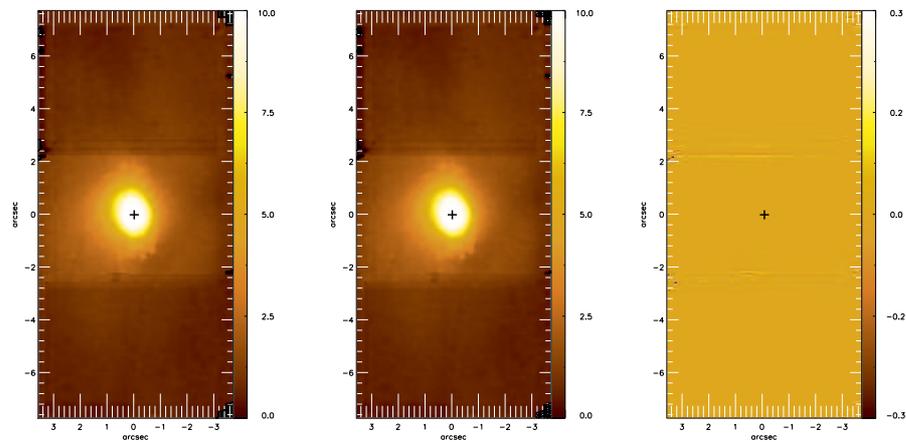


Figura 2.8: Imagem de contínuo do cubo de dados antes da filtragem (esquerda); imagem do contínuo após a filtragem espacial de Butterworth; resíduos correspondentes a diferença entre a imagem original e filtrada (direita), usou-se $n = 5$ e frequência de corte de 0.5 Ny. Os fluxos estão mostrados em unidades de $10^{-17} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

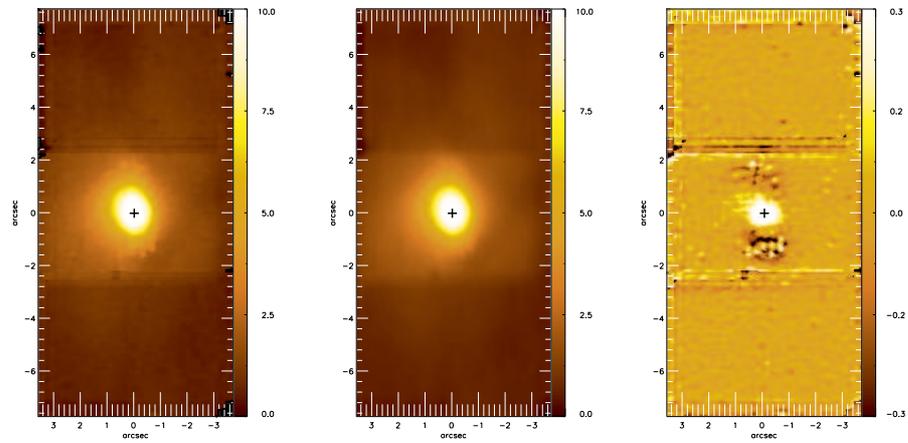


Figura 2.9: Imagem de contínuo do cubo de dados antes da filtragem (esquerda); imagem do contínuo após a filtragem espacial de Butterworth; resíduos correspondentes a diferença entre a imagem original e filtrada (direita), usou-se $n=1$ e frequência de corte de 0.1 Ny . Os fluxos estão mostrados em unidades de $10^{-17} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

Capítulo 3

Resultados

O cubo final contém 16170 espectros cobrindo a região espacial de tamanho $7.35'' \times 5.5''$, centrado no núcleo com uma amostragem espacial de $0.05'' \times 0.05''$ e cobrindo uma região espectral de 5600 \AA a 7000 \AA . Realizamos a extração de espectros unidimensionais em diferentes posições da galáxia para uma abertura de $0.25'' \times 0.25''$, correspondente ao tamanho de 5×5 pixels espaciais. Na figura 3.1 apresenta-se o espectro nuclear, com as principais linhas de emissão identificadas $H\alpha \lambda 6563$, $[N \text{ II}] \lambda\lambda 6548, 6584$ e $[S \text{ II}] \lambda\lambda 6716, 6731$.

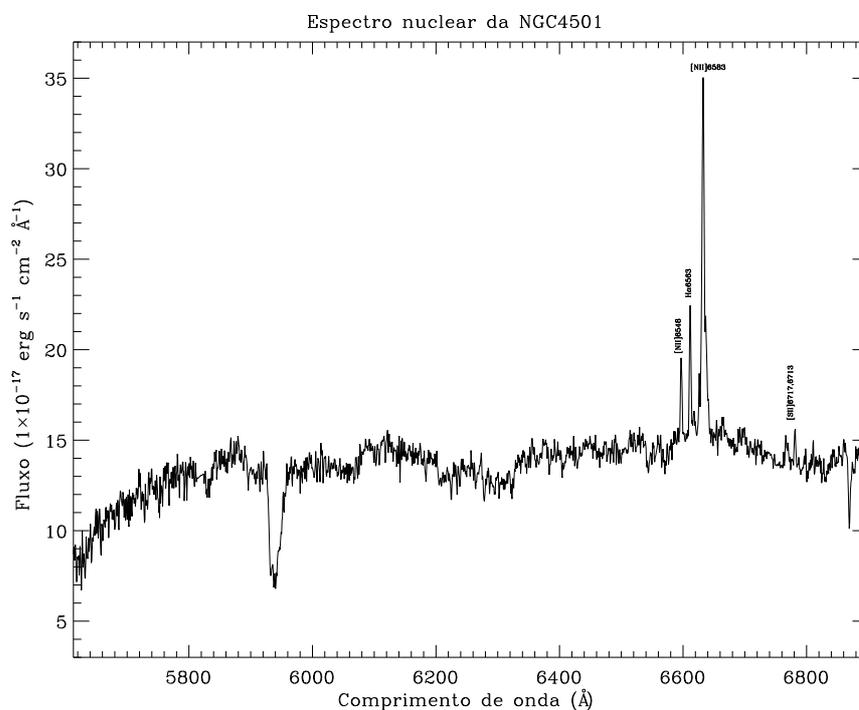


Figura 3.1: Espectro nuclear de NGC 4501 para uma abertura de $0.25 \text{ arcsec} \times 0.25 \text{ arcsec}$ com as principais linhas de emissão $H\alpha \lambda 6563$, $[N \text{ II}] \lambda\lambda 6548, 6584$ e $[S \text{ II}] \lambda\lambda 6716, 6731$ identificadas.

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 α . Outra observação são as linhas de enxofre, as quais são bem fracas, mas poderão ser usadas para determinar a densidade eletrônica do gás. Na figura 3.2 apresenta-se espectros obtidos para a mesma abertura em regiões distantes 1" do núcleo para norte (topo - esquerda), leste (topo - direita), oeste (base - esquerda) e sul (base - direita), nos quais as mesmas linhas de emissão presentes no espectro nuclear são observadas, porém com intensidades relativas diferentes.

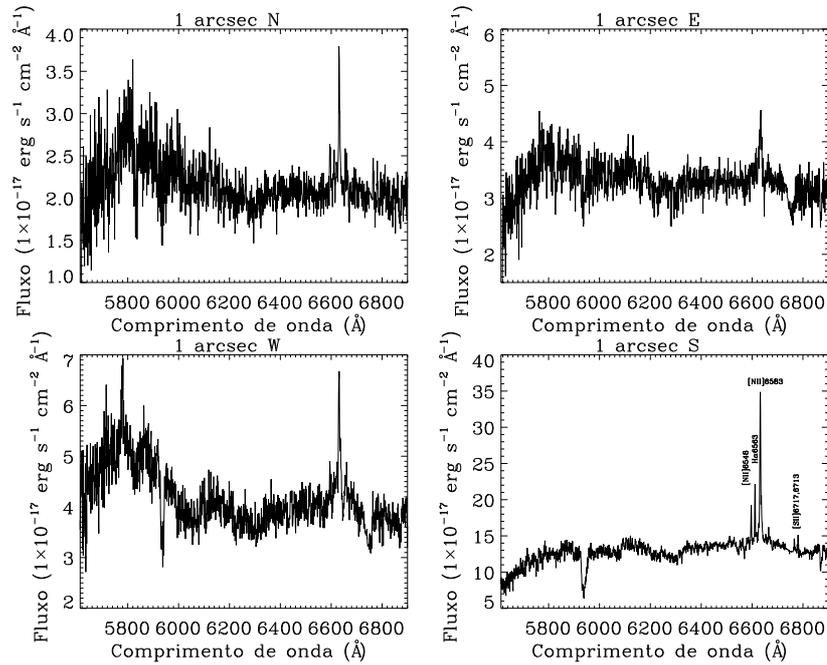


Figura 3.2: Espectros de NGC 4501 para as posições mostradas no topo de cada panel.

3.0.9 Distribuição de Fluxos

Ajustamos curvas Gaussianas ao perfil das linhas de emissão do gás H α λ 6563, [N II] λ 6548,6584, [S II] λ 6716,1731 e [O I] λ 6302 usando a rotina **PROFIT** (Riffel, 2010), que faz ajustes por mínimos quadrados não lineares, fornecendo como parâmetros de saída o campo de velocidades, distribuições de fluxos e dispersões de velocidades. As linhas H α e de [N II] foram ajustadas simultaneamente matendo 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 $v = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} c$, 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. A dispersão de velocidades é obtida a partir da largura a meia altura do perfil, FWHM - *Full Width at Half Maximum*, por $\sigma = \text{FWHM}/2.35$. Os fluxos são

obtidos pela integral da curva gaussiana. Na figura 3.3, apresenta-se mapas das distribuições de fluxos para as linhas de emissão do gás.

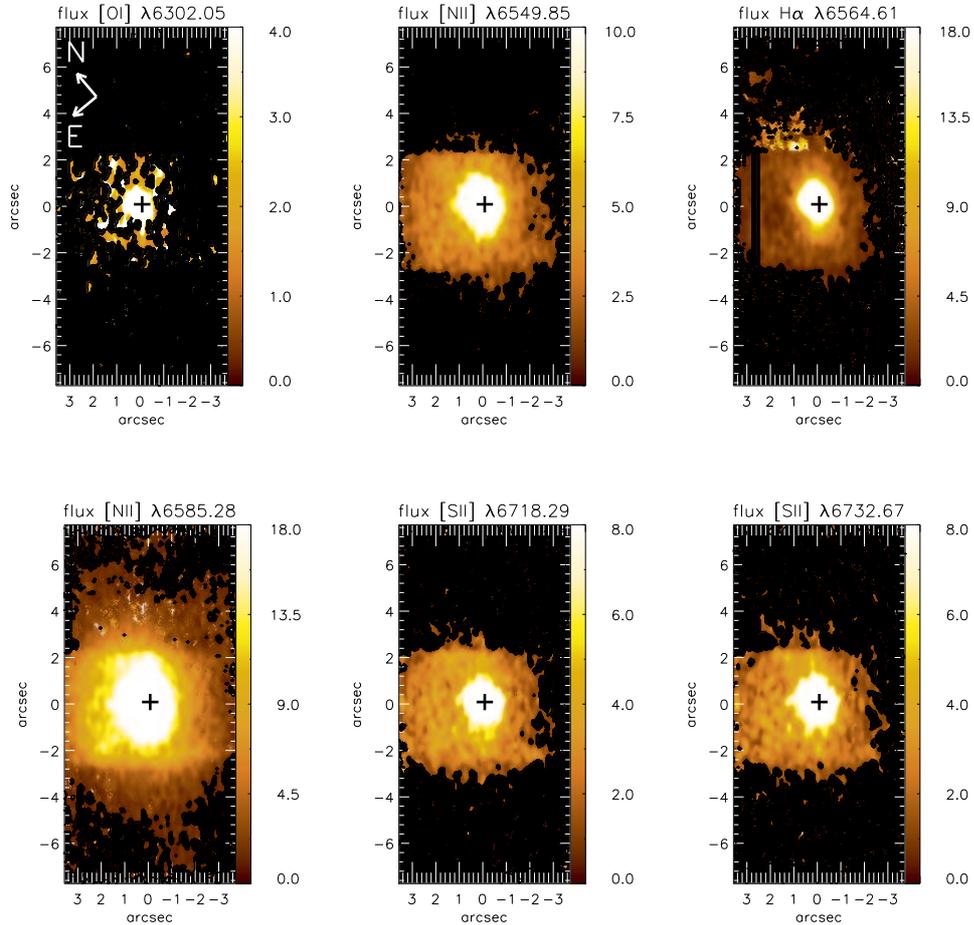


Figura 3.3: Mapas de fluxos para as linhas de emissão H α , [N II], [S II] e [O I] obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. Os fluxos são mostrados em unidades de 10^{-17} ergs $^{-1}$ cm $^{-2}$.

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] λ 6585 apresenta emissão que se estende até as bordas do campo observado.

3.1 Cinemática do Gás

Na figura 3.4, apresenta-se mapas para os campos de velocidades para as linhas de emissão do gás. 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 kms $^{-1}$, embora assim 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.

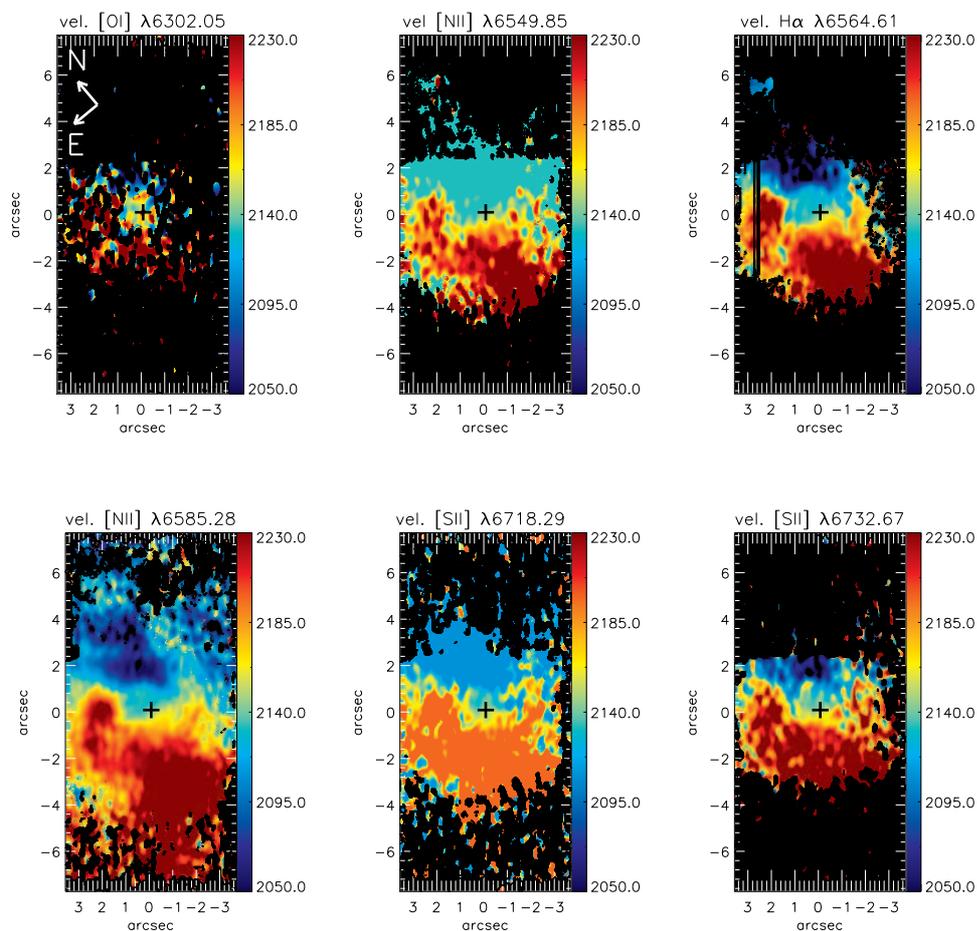


Figura 3.4: Campos de velocidades para as linhas de emissão $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e $[O I]$ obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. As barras de cores mostram a escala em kms^{-1} .

Na figura 3.5, 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 kms^{-1} a 100 kms^{-1} , enquanto que o $H\alpha$ geralmente apresenta valores menores de σ , com os valores mais elevados chegando a $\sim 100 \text{ kms}^{-1}$. Os maiores valores de σ para todas as linhas de emissão são observados em 2-3'' a nordeste do núcleo.

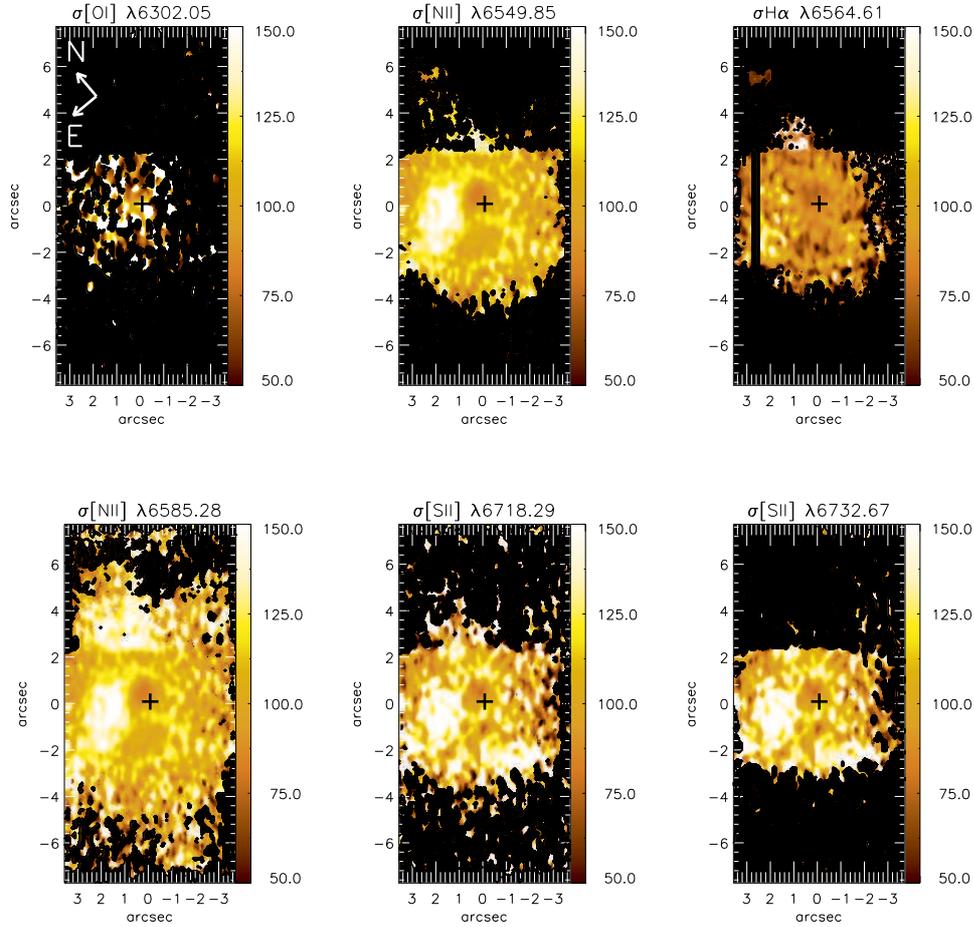


Figura 3.5: Mapas de σ para as linhas de emissão $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$ e $[O I]$ obtidos por ajustes no perfil das linhas de emissão por curvas gaussianas. As barras de cores mostram a escala em kms^{-1}

Uma observação quanto aos mapas mostrados anteriormente são os pontos pretos presentes nos mapas, que correspondem a locais onde não foi possível realizar os espectros das linhas devido a uma baixa razão sinal/ruído.

3.2 Excitação do Gás

Baldwin, Phillips & Terlevich (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 mais fortes, influenciadas por características do nível de ionização de cada objeto. Os pares de linhas utilizados foram $[N II]/H\alpha$, $[O III]/H\beta$. Na figura 3.6 apresenta-se um mapa para da razão $[N II]/H\alpha$. Observa-se valores entre 1 e 10 para esta razão, com os menores valores observados no núcleo e os maiores

valores observados a direita do núcleo. Esta razão pode ser utilizada para estudar a excitação do gás. Região $H\alpha$ 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 maiores valores (Storchi - Bergmann et al., 2007). A figura 3.6 indica que a contribuição de choques é mais importante para nordeste, onde os valores atingem $[N II]/H\alpha \approx 10$

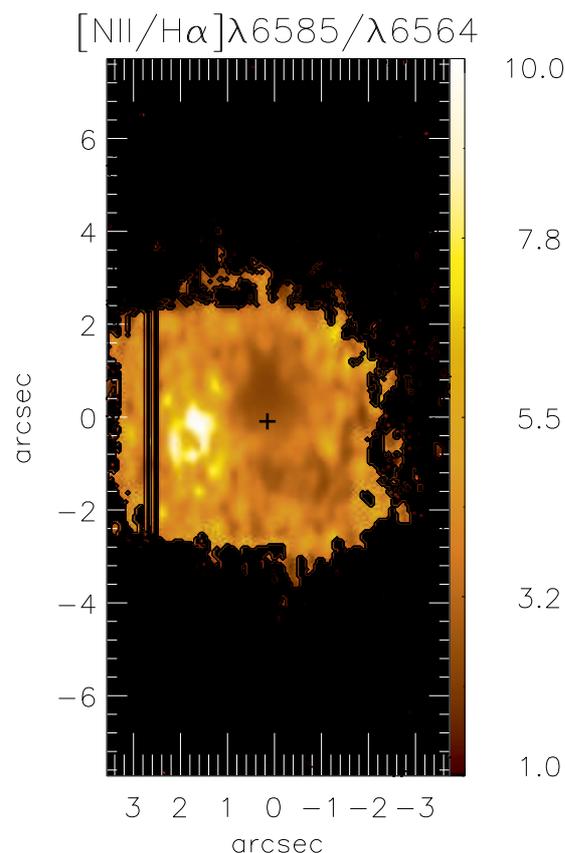


Figura 3.6: Mapa da razão entre as linhas de emissão de $[N II]/H\alpha$

3.3 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 tem diferentes probabilidades de transição radiativa ou taxa de desexcitação colisional, a população relativa destes níveis será altamanete dependente da densidade eletrônica, assim como as razões de intensidade das linhas emitidas por estas transições terá igual de-

pendência. Os melhores exemplos de razões de linha para determinar a densidade eletrônica são [O II] e [S II], estas razões são usadas por serem mais intensas que outras razões de linhas. Os parâmetros atômicos de [O II] necessário para a determinação da densidade eletrônica são menos precisos do que os parâmetros de [S II] (Copetti & Writzl, 2002). Além disso as linhas de [S II] são bem separadas em comprimentos de onda e suficientemente brilhantes, por esses motivos muitas vezes se usa a razão das linhas de [S II] para determinar a densidade eletrônica (Riffel, 2004).

Determinamos a densidade eletrônica a partir das linhas de enxofre ($[S II] \lambda 6732/\lambda 6718$), pela razão das mesmas obtendo um mapa para cada ponto da densidade, usando a tarefa *temden* do pacote *stsdas.nebular* do IRAF.

Na figura 3.8, apresentamos o mapa de densidade eletrônica, onde observa-se valores próximos a 100 cm^{-3} no núcleo e fora do núcleo um disco de alta densidade com valores chegando a 900 cm^{-3} .

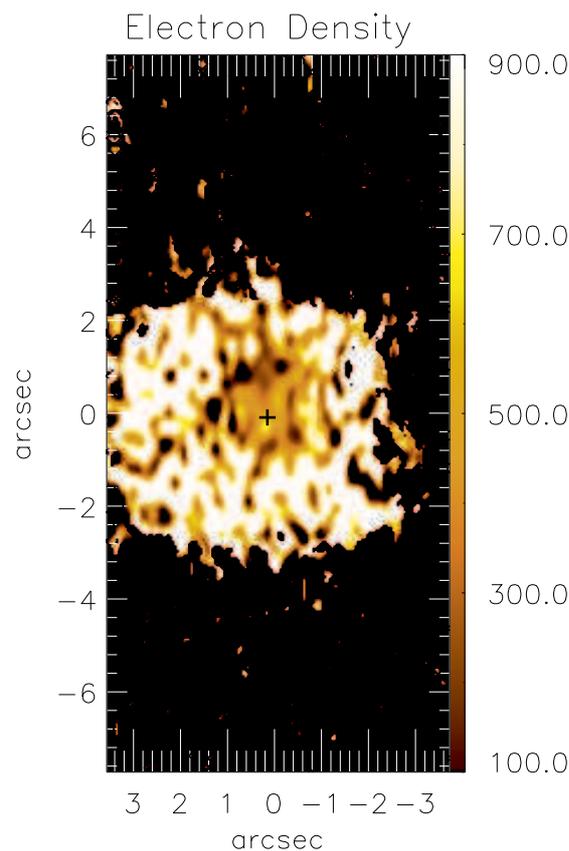


Figura 3.7: Mapa de densidade eletrônica a partir da razão das linhas de enxofre.

3.4 Cinemática Estelar

Utilizamos a técnica pPXF (*penalized Pixel-Fitting*) de Capellari & Emsellem (2004) para obter as distribuições de velocidades das estrelas ao longo da linha de visada (LSDV - *Line-of-Sight Velocity Distribution*). Os ajustes foram realizados no intervalo espectral entre 5890 a 6010 Å, que inclui a absorção estelar do Na I, com comprimento de onda de repouso em 5897 Å. O ajuste do espectro com o pPXF requer o uso de uma biblioteca de espectros estelares como templates. Neste trabalho utilizamos como templates espectros selecionados dos modelos de Bruzual & 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 LSDV em relação a uma distribuição de velocidade gaussianas) a partir de cada espectro. O parâmetro h_3 mede desvios assimétricos (como por exemplo as asas dos perfis das linhas) e o h_4 mede desvios simétricos (o achatamento) da LSDV 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 ($V_*, \sigma_*, h_3, \dots, h_M$).

Na figura 3.7, apresentamos mapas para a velocidade radial (painel da esquerda) e dispersão de velocidades (painel da direita) das estrelas.

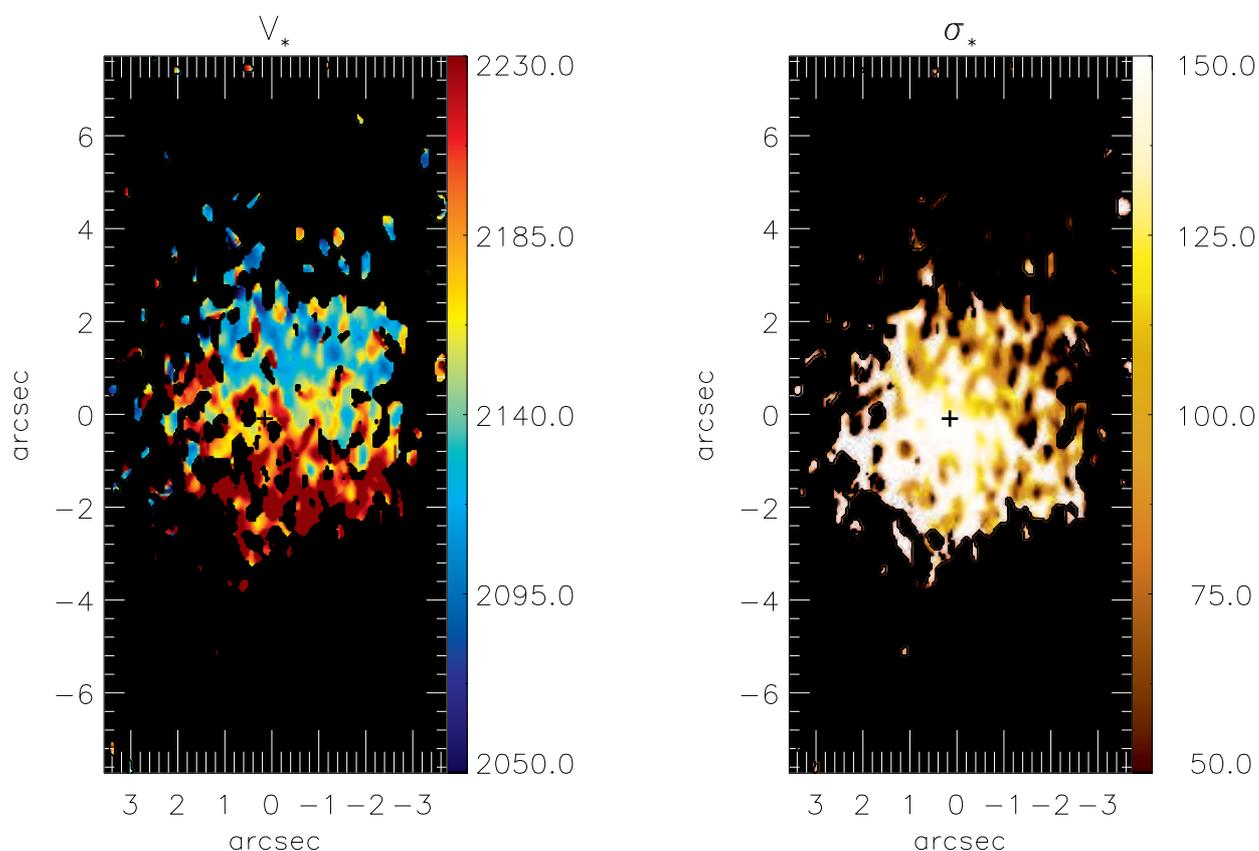


Figura 3.8: Campos de velocidade estelar (esquerda) e mapa de dispersão de velocidade estelar (direita). As barras de cores mostram a escala em kms^{-1} .

O campo de velocidade 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 ruidoso, observa-se claramente que possui um comportamento similar aos campos de velocidades do gás (Fig. 3.4). O mapa de dispersão de velocidade das estrelas apresenta valores variando entre 80 e 150 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 $\sigma_* = 160 \pm 13 \text{ km s}^{-1}$, conforme apresentado na base de dados Hyperleda¹. Verificamos que o valor obtido está de acordo com o valor da literatura. A massa do buraco negro central pode ser estimada usando a relação M- σ Graham et al. (2011), Gebhardt et al. (2000) e Ferrarese et al. (2000):

¹<http://leda.univ-lyon1.fr/ledacat.cgi?o=NGC%204501>

$$\log(M/M_{\odot}) = (8.13 \pm 0.05) + (5.13 \pm 0.34) \log [(\sigma_{*})/200 \text{ kms}^{-1}] \quad (3.1)$$

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. As massas de BNS no centro das galáxias variam de 10^6 a $10^9 M_{\odot}$.

Capítulo 4

Considerações finais

4.1 Conclusões

Neste trabalho realizamos um mapeamento bidimensional da distribuição, ionização, densidade eletrônica e cinemática do gás na região central da galáxia ativa NGC 4501 utilizando espectroscopia de campo integral na região óptica do espectro eletromagnético com o telescópio Gemini de 8m, da cinemática estelar a partir do ajuste de linhas de absorção presentes no espectro ótico de NGC 4501. Os principais resultados são:

- o gás apresenta desvios significativos que podem estar associados a *inflows*;
- devido a choques por excitação do gás a nordeste do núcleo, como evidenciado pelo valor da razão de $[N II]/H\alpha$ os valores atingem ≈ 10
- o mapa de densidade eletrônica apresenta valores entre 100 cm^{-3} no núcleo a 900 cm^{-3} fora do núcleo com um anel de altas densidades.
- o campo de velocidade estelar é dominado por rotação, embora bastante ruidoso, observa-se claramente que possui um comportamento similar aos campos de velocidades do gás.
- a massa do buraco negro central pode ser estimada pela relação $M - \sigma$, apresentando valor de $M_{BH} = 3_{-2}^{+5} \times 10^7 M_{\odot}$, representando um buraco negro de tamanho intermediário.

4.2 Perspectivas

O presente trabalho representa a base do trabalho de mestrado, no qual pretendemos estimar erros nas medidas via simulações de Monte Carlo. Ajustar modelos do campo de velocidades, quantificar *inflows* de gás em direção ao núcleo de NGC 4501 e fazer uma análise no cubo de dados usando a técnica de Tomografia PCA (*Principal Component Analysis*) (Steiner et al., 2009).

Bibliografia

- [1] Adams T. F.; **A Survey of the Seyfert Galaxies Based on Large-Scale Image-Tube Plates.** ApJS, 1997, vol.33.
- [2] Antonucci, R.; **Unified models for active galactic nuclei and quasars.** Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v.31, p.473-521,1993.
- [3] Baldwin, J. A.; Phillips, M. M.; Terlevich, R. **Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects.** Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v. 93, p. 5–19, fev. 1981.
- [4] Bruzual G., Charlot S., 2003, MNRAS, 344, 1000
- [5] Cappellari M., Emsellem E., 2004, PASP, 116, 138
- [6] Copetti, M. V. F., Writzl, B. C., 2002, A&A, 382,282
- [7] Ferrarese, L. Merrit, D., 2000, ApJ, 547, 140.
- [8] Gebhardt, K. et al. 2000, ApJ, 539, 13.
- [9] Graham, A. W., Onken, C. A., Athanassoula, E., Combes, F., 2011, MNRAS, 412, 2211.
- [10] De Vaucouleurs, G., De Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., et al. 1991; **Third Reference Catalogue of Bright Galaxies** (New York: Springer) (RC3)
- [11] Diniz, M. R.; **Uma Biblioteca de Estrelas para Medidas de Cinemática Estelar em Galáxias.**, Monografia, UFSM, Santa Maria, 2011.
- [12] Guhathakurta, P., Van Gorkom, J. H., Kotanyi, C. G., Balkowski, C. 1988, AJ,96, 851.
- [13] Jones, M. H., Lambourne R. J.; **An Introduction to Galaxies and Cosmology**, Cambridge University Press), 2004.
- [14] Menezes, R. B.; **Espectroscopia 3D de núcleos ativos de galáxias: tratamento e análise de dados no óptico e infravermelho próximo.** Tese de Doutorado, IAG/USP, 2012.
- [15] Neil, F. Comins ; Kaufmann J.; **Descobrimo o Universo**, 8. ed. Bookman, Porto Alegre, 2012.

- [16] Onodera, Sachico; et al.; **Virgo High-Resolution CO Survey: IV. Spiral-Driven Gas Dynamics in the Non-Barred Seyfert Galaxy NGC 4501**, Astronomical Society of Japan, 2004
- [17] Osterbrock, D. E.; **Observational Model of the Ionized Gas in Seyfert and Radio-Galaxy Nuclei**. Proceedings of the National Academy of Science, 1978, vol.75.
- [18] Peterson, B. M.; **An Introduction to Active Galactic Nuclei**, Cambridge University Press, 1997.
- [19] Riffel, Rogemar A., 2010, Ap&SS, 327, 239
- [20] Riffel, R.; **Estudo da Região H II galáctica NGC 2579.**, Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria, 2004.
- [21] Storchi-Bergmann, T.; Dors, O. L., JR.; Riffel, R. A.; Fathi, K.; Axon, D. J.; Robinson, A.; Marconi, A.; Ostlin, G. **Nuclear Spirals as Feeding Channels to the Supermassive Black Hole: The Case of the Galaxy NGC 6951**. Astrophysical Journal, v. 670, p. 959–967, December 2007.
- [22] Sil’Chenko, O. K., and A. N. Burenkov and V. V. Vlasyuk; **Chemically Decoupled Nuclei in the Spiral Galaxies NGC 4216 and NGC 4501**. The Astronomical Journal, 117: 826-838, 1999 February.
- [23] Steiner, J. E., Menezes, R. B., Ricci, T. V. Oliveira, A. S. 2009, MNRAS, 396, 788
- [24] Van Der Marel, R. P.; Franx, M. **A new method for the identification of non-Gaussian line profiles in elliptical galaxies**. Astrophysical Journal, v. 407, p. 525–539, April 1993.
- [25] Vollmer, B. et al.; **Pre-peak ram pressure stripping in the Virgo cluster spiral galaxy NGC 4501**, A&A 483, 89–106 (2008).