

Guilherme dos Santos Couto

Atividade Nuclear na Galáxia Arp102 B

Porto Alegre

21 de Junho de 2010

Guilherme dos Santos Couto

Atividade Nuclear na Galáxia Arp102 B

Trabalho de conclusão de curso desenvolvido
sob orientação da Profa. Dra. Thaisa Storchi-
Bergmann.

INSTITUTO DE FÍSICA
UFRGS

Porto Alegre

21 de Junho de 2010

SUMÁRIO

1	Introdução	p. 3
1.1	AGNs e Galáxias Ativas	p. 3
1.2	Rádio-Galáxias	p. 5
1.3	A Galáxia Arp102 B	p. 5
1.4	Objetivos	p. 7
2	Observações e Redução de Dados	p. 8
3	Resultados	p. 10
3.1	Distribuições e Razões de Fluxo de Linhas de Emissão	p. 11
3.2	Diagramas Diagnóstico	p. 15
3.3	Cinemática do Gás	p. 16
4	Discussão	p. 19
4.1	<i>Channel Maps</i>	p. 19
4.2	Análise PCA	p. 22
5	Conclusões	p. 24
	REFERÊNCIAS	p. 25

1 INTRODUÇÃO

Evidências observacionais acumuladas principalmente depois do lançamento do Telescópio Espacial Hubble indicam que todas as galáxias que tem um bojo estelar hospedam buracos negros supermassivos (SMBHs, de *supermassive black holes*) em seus centros. Chamamos de galáxias ativas aquelas onde a região central tem alta luminosidade e emite radiação não-térmica, ou seja, de origem não-estelar, em todos os intervalos de espectro eletromagnético. A radiação emitida por núcleos de galáxias ativas (AGNs, de *active galactic nucleus*) é muitas vezes de natureza sincrotrônica, como é o caso das rádio-galáxias. No caso específico das rádio-galáxias, são também atribuídos a AGNs a formação de jatos relativísticos originados dos fortes campos magnéticos gerados próximo ao SMBH, além de variabilidade na emissão espectral.

Por serem objetos muito luminosos, podem ser observados a grandes distâncias, possibilitando o estudo de evolução de galáxias, e também servem como parâmetros em modelos cosmológicos. O estudo da física desses objetos é fundamental para podermos entender a formação das galáxias atuais.

1.1 AGNs e Galáxias Ativas

A alta luminosidade atribuída a AGN deve-se à física que envolve o SMBH central, que tem massas da ordem de 10^6 a $10^{10} M_{\odot}$. Segundo modelos unificados de AGN (Antonucci, 1993; Urry & Padovani, 1995) o SMBH é envolvido por um disco de acreção feito por gás aquecido por dissipação de energia na transferência de matéria das partes externas do disco até o SMBH. Sendo aquecido a altas temperaturas, o gás emite em todos os comprimentos de onda, com um excesso no ultravioleta. A emissão do disco de acreção ioniza o gás externo, que por sua vez emite radiação não-térmica. O disco de acreção tem dimensão semelhante ao sistema solar.

Além do disco de acreção temos mais para fora a região de linhas largas (BLR, de *broad-line region*), formada por gás com altas velocidades orbitais, em torno de 5000 km s^{-1} . Essa região, por causa da alta velocidade, emite linhas largas. A análise das linhas largas dá informações

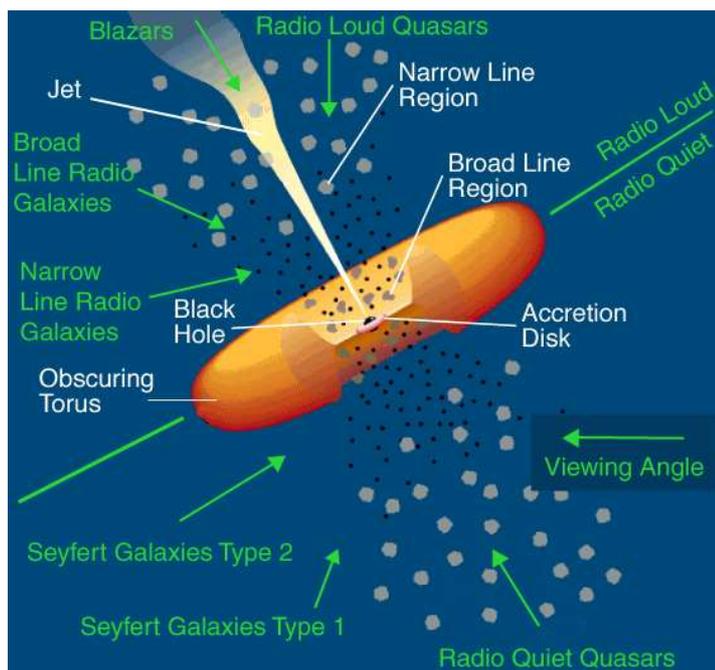


Figura 1.1: Ilustração do modelo unificado de AGNs. Observa-se que para diferentes ângulos de visão, temos diferentes classificações de núcleos ativos (em verde). Em branco estão nomeadas as diferentes regiões que circundam o SMBH.

sobre a cinemática mais interna do AGN. Nem o disco de acreção nem a BLR são resolvidos espacialmente por telescópios atuais, sendo impossível identificá-los via fotometria.

Um toro de gás molecular se localiza em torno da BLR, em um raio interno menor que 1 pc, fazendo com que a visão do núcleo seja bloqueada em determinados ângulos de visão. No caso de impedimento da visualização da BLR, o AGN é classificado como tipo 2, caso contrário ele é do tipo 1. Na Fig. 1.1 está ilustrado um dos modelos unificados mais utilizados.

A região de linhas estreitas (NLR, de *narrow-line region*) fica além da BLR, tem dimensões de centenas de pc até unidades de Kpc, e é formada por gás com velocidades menores, em torno de 400 km s^{-1} . A emissão de linhas estreitas no espectro por essa região resulta da baixa velocidade. Por estar localizada numa escala espacial maior que a BLR, é possível resolver essa região com os telescópios atuais. Assim podemos analisar a cinemática espacialmente, inclusive estudar mecanismos de ejeção de gás.

Em muitos AGNs ocorre a presença de jatos relativísticos. Esses jatos, na maioria das vezes perpendiculares ao disco de acreção, são formados por parte da matéria acreçada pelo disco, que é acelerada relativisticamente, possivelmente devido ao campo magnético do AGN. Jatos relativísticos podem chegar a centenas de kiloparsecs, podendo influenciar a morfologia e evolução da galáxia hospedeira.

1.2 Rádio-Galáxias

Rádio-Galáxias são um tipo de galáxia ativa caracterizadas por sua alta emissão em comprimentos de onda de rádio. São também conhecidas por suas grandes regiões emissoras de rádio, que se estendem a distâncias maiores que a extensão da própria galáxia hospedeira (Fig. 1.2). Jatos relativísticos são muito comuns em rádio-galáxias, muitas vezes formando pares de lóbulos em posições opostas em relação ao núcleo. Outra característica é que a maioria das galáxias hospedeiras são do tipo elípticas.

Dependendo da sua luminosidade e do tipo espectral podemos classificar de outra forma as galáxias ativas. Quasares são muito luminosos em todos os comprimentos de onda tendo uma luminosidade tão alta que os tornam os objetos que podem ser observados às maiores distâncias no universo. Já LINERs (de *low-ionization nuclear emission-line region galaxy*) são núcleos ativos em geral pouco luminosos definidos por suas linhas espectrais. O espectro típico de LINER possui emissão mais intensa de linhas de baixa ionização, como o [O I] λ 6300 e [N II] λ 6548, enquanto linhas de alta ionização são de menor intensidade.

Galáxias Seyfert possuem em geral baixa emissão em rádio. Possuem espectro similar ao de quasares, mas são menos luminosos que estes. Logo, podemos identificar com facilidade a galáxia hospedeira, algo que não ocorre com quasares. Seyferts emitem fortemente em linhas de alta ionização e são classificadas como de tipo 1, quando possuem emissão em linhas largas, ou de tipo 2, quando não possuem.

1.3 A Galáxia Arp102 B

A galáxia Arp102 B é uma rádio-galáxia com linhas de emissão de Balmer muito largas e com duplo-pico, e um espectro óptico de linhas estreitas do tipo LINER (Stauffer, Schild & Keel, 1983; Chen, Halpern & Filippenko, 1989; Chen & Halpern, 1989), levando a uma classificação de LINER/Seyfert 1. Stauffer, Schild & Keel (1983) sugeriram que em uma passagem próxima da galáxia companheira Arp102 A, seu gás acabou por provocar a atividade na galáxia Arp102 B ao abastecer a região central da galáxia de gás. Chen, Halpern & Filippenko (1989) e Chen & Halpern (1989) modelaram a emissão de duplo-pico como originária da parte externa do disco de acreção em rotação Kepleriana, iluminada e ionizada por um torus iônico quente localizado na parte interna do disco de acreção. Linhas de emissão de duplo-pico largas foram achadas em outros núcleos de galáxias ativas (AGN), incluindo outras rádio-galáxias como a 3C 390.3 (Oke, 1987; Perez et al., 1988) e LINERs como a NGC 1097 (Storchi-Bergmann et al., 1993, 2003), com a

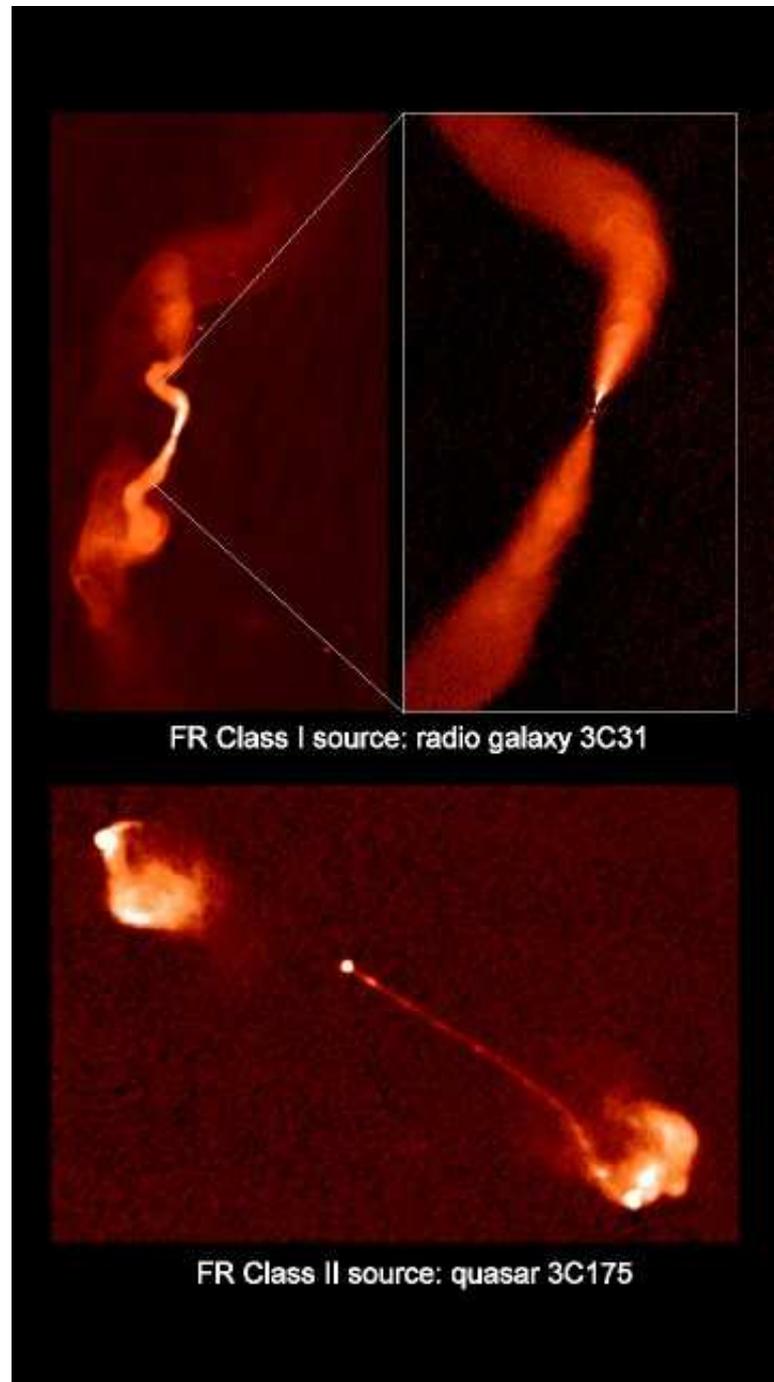


Figura 1.2: Exemplos de rádio-galáxias observadas em rádio: acima a galáxia 3C31 e abaixo a galáxia 3C175. Observa-se que os jatos em rádio chegam a distâncias muitas vezes maiores que a extensão da galáxia.

Arp 102B sendo considerada a “prototípica emissora de duplo-pico”.

Apesar da galáxia Arp102 B ser classificada como uma galáxia E0, foram encontrados (Fathi et al., em preparação) braços espirais compactos em imagens feitas no contínuo e na banda estreita de $H\alpha$ obtidas com a *Advanced Camera for Surveys* (ACS) do *Hubble Space Telescope* (HST), cuja possível origem seja a interação com a galáxia Arp102 A. Espirais compactas (observadas dentro do kiloparsec interno) tem sido sugeridas como possíveis caminhos para o gás se deslocar ao centro da galáxia e servir de combustível para o buraco negro supermassivo nuclear (Maciejewski, 2004). Fathi et al. (2006) achou realmente movimentos de gás ionizado na galáxia LINER NGC 1097 ao longo das espirais nucleares, e Storchi-Bergmann et al. (2007) achou movimentos similares na espiral nuclear que circunda outro núcleo de galáxia LINER, a NGC 6951. O descobrimento de braços espirais na Arp102 B sugere outra possível evidência de abastecimento do SMBH através de tais braços.

Nós adotamos uma distância de 104.9 Mpc, o que resulta numa escala de $490.2 \text{ pc arcsec}^{-1}$ na galáxia (Eracleous & Halpern, 2004).

1.4 Objetivos

Nossos objetivos neste estudo são mapear a excitação e cinemática do gás nos kiloparsecs centrais da Arp102 B, para investigar a natureza das espirais nucleares e sua relação com o abastecimento do SMBH. Queremos também analisar as possíveis interações entre o jato rádio e o gás emissor de linhas através da análise da excitação e cinemática deste último.

2 OBSERVAÇÕES E REDUÇÃO DE DADOS

Os dados foram obtidos no *Gemini North Telescope* com o *Gemini Multi-Object Spectrograph Integral Field Unit* (GMOS IFU) (Allington-Smith et. al, 2002) em 6 de Abril de 2007, como parte do programa GN-2007A-Q-57, e consiste de seis exposições individuais de 900 s centradas em $\lambda 5850\text{\AA}$ com uma cobertura espectral de $\lambda 4400\text{\AA}$ a $\lambda 7300\text{\AA}$. Foi usada a rede de dispersão B600+_G5303 com a máscara IFU-R. A resolução espectral é 1.8 \AA (ou $\sim 85\text{ km s}^{-1}$) – derivado da largura a meia altura (FWHM) de uma linha de emissão da lâmpada de CuAr. A resolução angular é de 0.6 arcsec (correspondendo a 294 pc na galáxia) – adotada como a FWHM do perfil espacial da estrela de calibração de fluxo utilizada, a Feige 66. O GMOS IFU tem campo de visão retangular de aproximadamente $3.4'' \times 5.1''$, correspondendo a $1.7\text{ kpc} \times 2.5\text{ kpc}$ na galáxia. O eixo maior do IFU foi orientado ao longo do ângulo de posição $PA=65^\circ$.

O resultado das observações feitas no IFU é o que chamamos de cubo de dados (Fig. 2.1), que é constituído por imageamento em dois dos eixos do cubo, enquanto o terceiro eixo carrega a informação espectral. Assim o cubo resultante para análise da física da galáxia Arp 102B é formado por uma rede de 34×51 pixels com resolução de $0.1''$, que se projeta ao longo da dimensão espectral, criando um espectro de cada pixel espacial.

A redução de dados foi feita usando rotinas do pacote GEMINI.GMOS IRAF e outras rotinas genéricas de IRAF. O procedimento de redução inclui recorte das imagens, subtração de *bias*, *flat-fielding*, calibração de comprimento de onda, correção de distorção-s, subtração do céu e calibração de fluxo.

Para fazermos as análises físicas corrigimos os dados para refração atmosférica diferencial (Steiner et al., 2009) e aplicamos o algoritmo de deconvolução de Richardson-Lucy (Richardson, 1972; Lucy, 1974) ao cubo de dados.

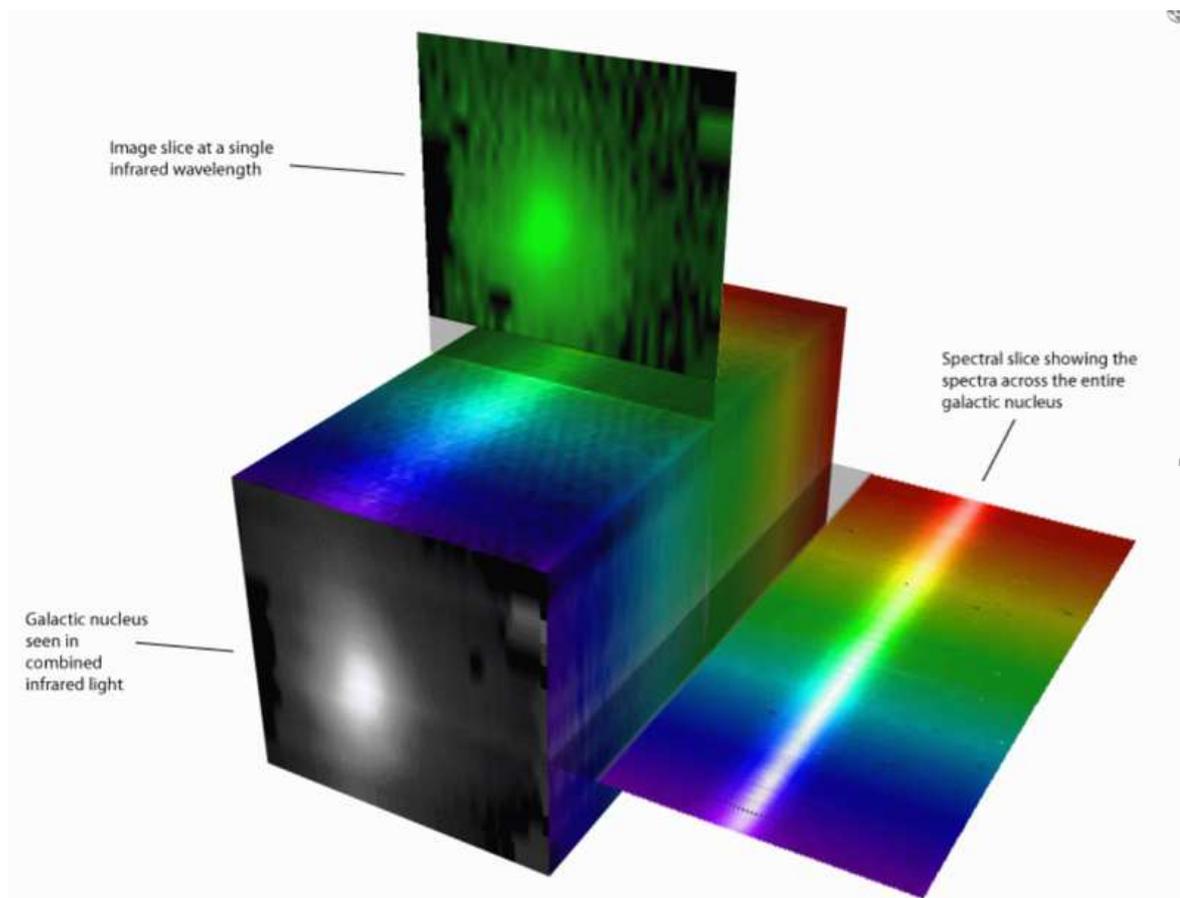


Figura 2.1: Ilustração de um cubo de dados. O imageamento é feito em dois eixos, e no terceiro eixo é feita a espectroscopia.

3 RESULTADOS

No painel superior esquerdo da Fig.3.1 apresentamos um mapa do contínuo centrado em $\lambda 6405\text{\AA}$ obtido com a câmara ACS do HST, da área interna de $9.6'' \times 9.4''$ da galáxia Arp102 B. O retângulo mostra o campo de visão do IFU orientado com seu eixo maior ao longo do ângulo de posição $PA=65^\circ$. No painel superior central mostramos um mapa de fluxo de $H\alpha$ também obtido com a câmara ACS dentro do campo de visão do IFU, mostrando dois braços espirais estendendo-se até ~ 500 pc do núcleo. Esses braços estão orientados aproximadamente ao oeste e ao leste, logo vamos nos referir a eles como “braço oeste” e “braço leste”. O painel superior direito mostra um mapa de fluxo de $H\alpha$ obtido a partir da nossa espectroscopia de IFU. Apesar de ter pior resolução espacial, esse mapa sugere que os braços espirais se estendem até ~ 1 kpc do núcleo. No painel inferior mostramos o espectro extraído do núcleo (posição N) e a ~ 1 arcsec ao nordeste do núcleo (posição A), pontos marcado no painel superior direito. Definimos a posição do núcleo como correspondente ao pico de emissão no contínuo. O espectro nuclear mostra o perfil de duplo pico de $H\alpha$ e $H\beta$, assim como as linhas de emissão estreitas em $H\beta$ λ 4862.68, [O III] λ 4960.29, [O III] λ 5008.24, [N I] λ 5199.35, [O I] λ 6302.05, [O I] λ 6365.54, [N II] λ 6549.85, $H\alpha$ λ 6564.61, [N II] λ 6585.28, [S II] λ 6718.29, [S II] λ 6732.67. Os valores dos comprimentos de onda das linhas de emissão foram obtidos a partir do banco de dados Atomic Line¹, e foram utilizados nos cálculos das velocidades radiais e dispersões de velocidades. Mas para entrar em acordo com a literatura, utilizaremos nesse trabalho as seguintes identificações usuais para as linhas de emissão: $H\beta$ λ 4861, [O III] λ 4959, [O III] λ 5007, [N I] λ 5199, [O I] λ 6300, [O I] λ 6364, [N II] λ 6548, [N II] λ 6583, $H\alpha$ λ 6563, [S II] λ 6716, [S II] λ 6731. Todas essas linhas – com a exceção das componentes de duplo pico largas – também estão presentes no espectros extranucleares, onde são mais estreitas.

Para mapear os fluxos e cinemática das linhas de emissão do gás, subtraímos a emissão de linha larga do espectro. Apesar da região de emissão de duplo pico não ser resolvida pelas nossas observações, o “borramento” do fluxo pelo *seeing* atmosférico faz com que a emissão de duplo pico contamine o espectro extranuclear até $\sim 0.3''$ do núcleo. Usando a linguagem

¹<http://www.pa.uky.edu/~peter/atomic/>

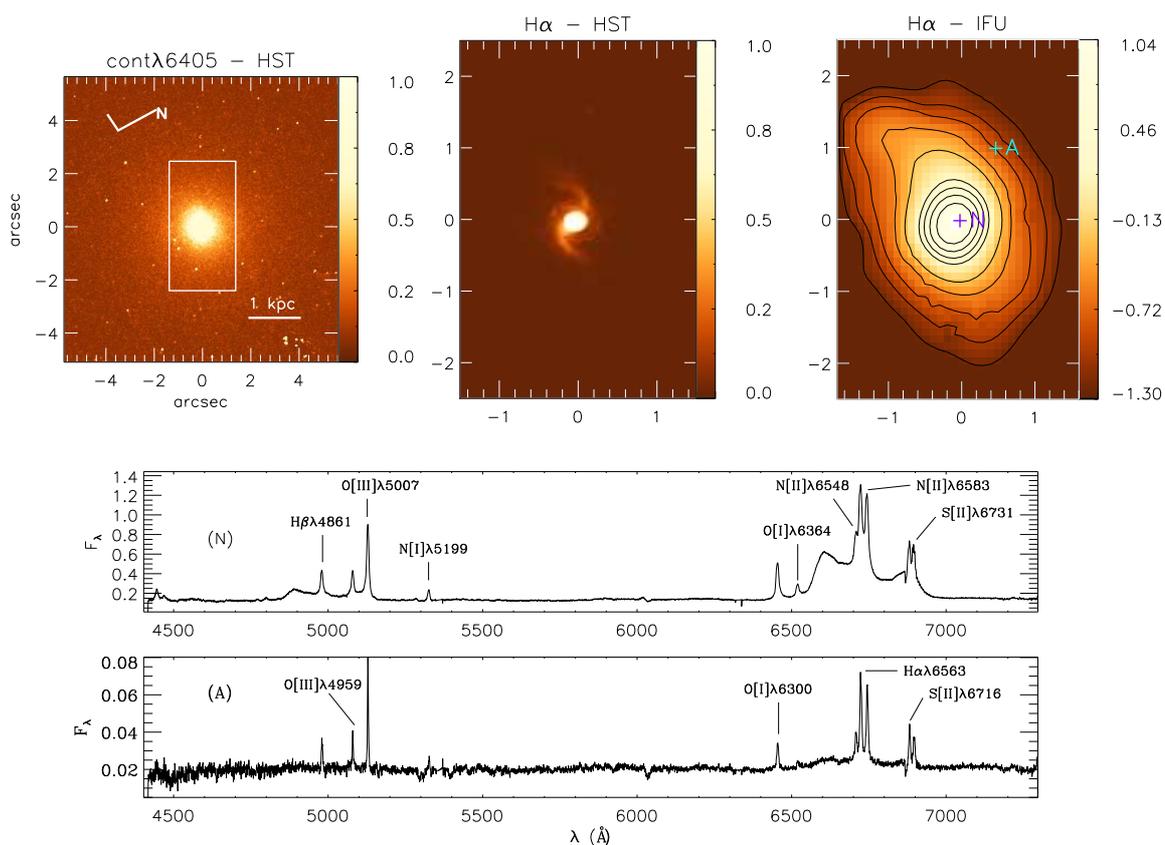


Figura 3.1: Painel superior esquerdo: mapa de fluxo do contínuo em $\lambda 6405\text{\AA}$ obtido com a câmera ACS do HST. O retângulo mostra o campo de visão do IFU do GMOS. Painel superior central: mapa de fluxo de $H\alpha$ obtido com o ACS, no campo de visão do IFU. Painel superior direito: mapa de fluxo de $H\alpha$ obtido com a nossa espectroscopia de IFU. Painéis inferiores: Espectro extraído nas posições N e A, marcadas no painel superior direito, com as linhas estreitas de emissão identificadas.

IDL², fitamos três Gaussianas ao perfil largo de $H\alpha$, o qual foi subtraído no espectro. Este procedimento elimina eficientemente a componente larga do espectro.

3.1 Distribuições e Razões de Fluxo de Linhas de Emissão

Uma vez que o espectro não contém mais componentes de linha larga significativos, obtemos as distribuições de fluxo nas linhas de emissão através da integração do fluxo sob cada perfil de linha subtraindo a contribuição do contínuo. Isso foi feito utilizando uma versão do programa em IDL PROFIT, que ajusta gaussianas às linhas, com colaboração de Rogemar A. Riffel (Riffel, 2010).

²Interactive Data Language, <http://itvis.com/idl>

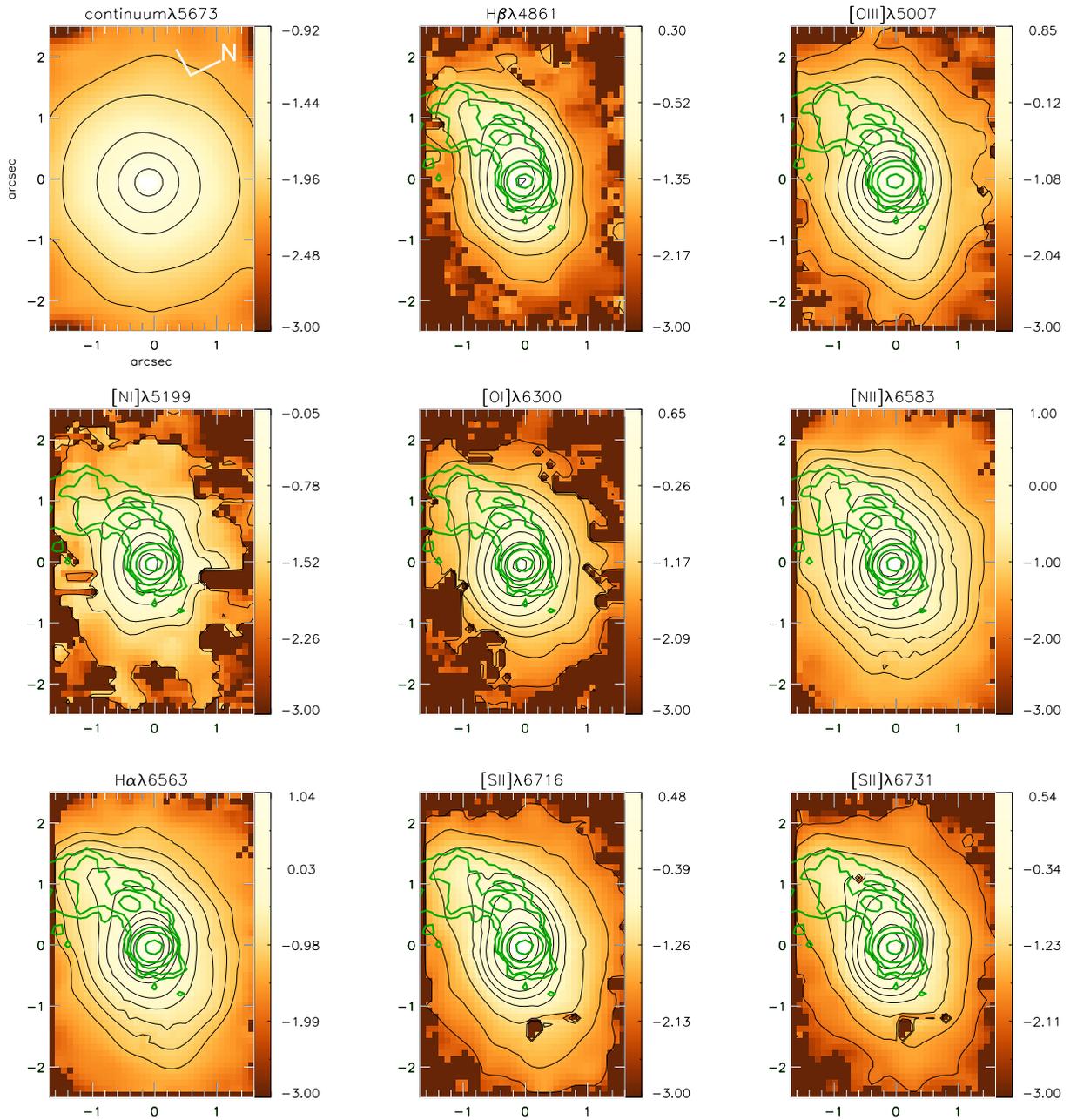


Figura 3.2: Mapas de fluxo nas linhas de emissão identificadas obtidas pela integração do fluxo sob os perfis de linha depois de subtração da contribuição do contínuo. Contornos em verde são de uma imagem em radio em 8.4 GHz. Unidades de fluxo são 10^{-15} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ spaxel $^{-1}$ e são mostradas em escala logarítmica.

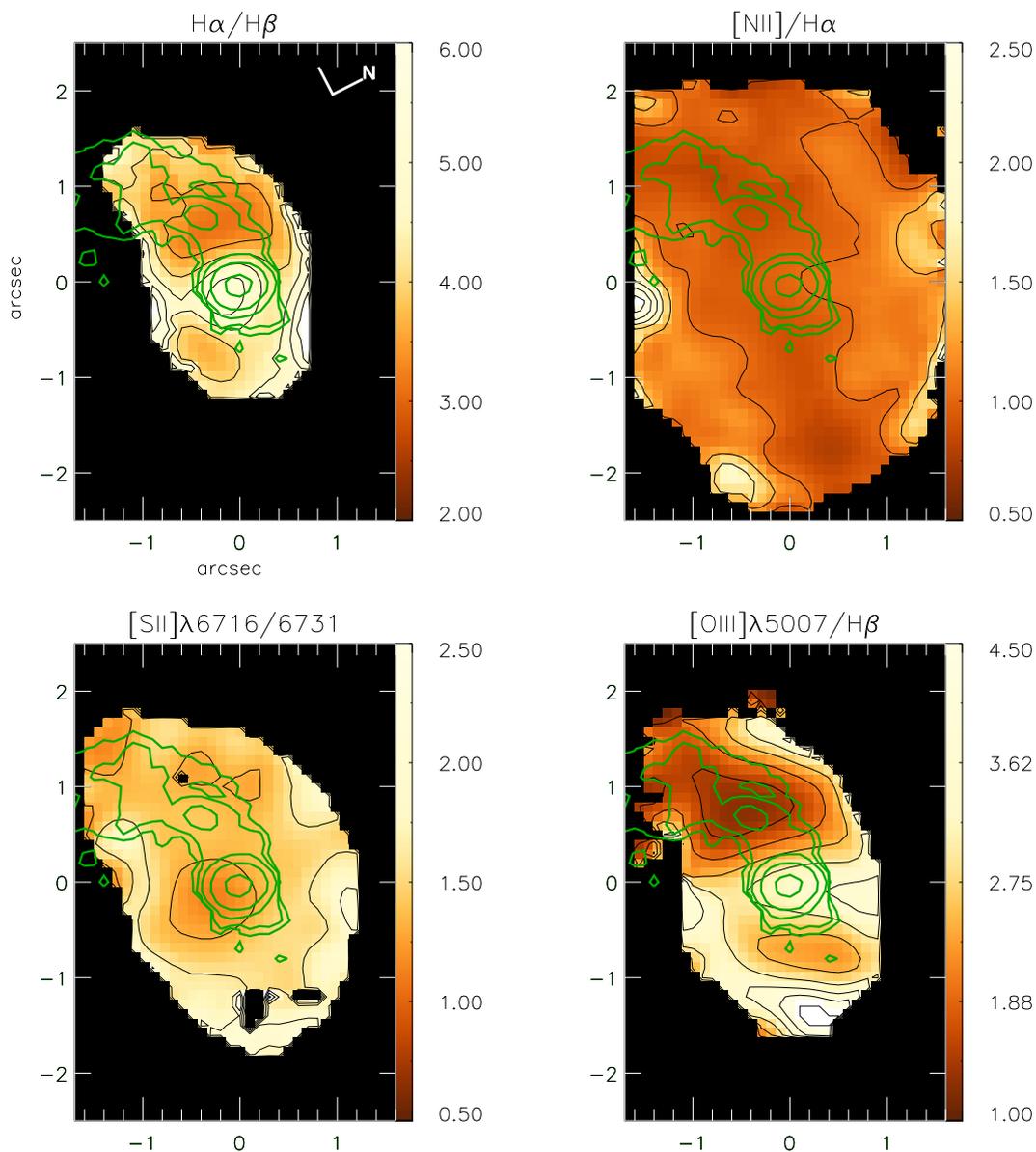


Figura 3.3: Mapas de razão entre linhas de emissão com contornos em verde mostrando a estrutura rádio. Painel superior esquerdo: razão $H\alpha/H\beta$. Painel superior direito: razão $[NII]6584/H\alpha$. Painel inferior esquerdo: razão das linhas de emissão de $[SII]$. Painel inferior direito: razão $[OIII]5007/H\beta$.

Na Fig.3.2 apresentamos mapas de fluxo no contínuo e nas linhas de emissão em $H\beta$, $[O III] \lambda 5007$, $[N I] \lambda 5199$, $[O I] \lambda 6300$, $[N II] \lambda 6584$, $H\alpha$, $[S II] \lambda 6717$, $[S II] \lambda 6731$. O mapa do contínuo mostra pouca estrutura, tendo uma distribuição de fluxo com aparente simetria circular. As distribuições de fluxo nas linhas de emissão mostram um comportamento distinto, sendo alongados a leste e oeste, seguindo os braços espirais observados nas imagens da ACS do HST. O braço a leste é melhor definido e mais estendido em comparação ao braço a oeste para todas as linhas de emissão exceto o $[O III]$, no qual a extensão dos dois braços são comparáveis. Os contornos em verde são imagens em rádio em 8.4 GHz, observadas com o telescópio VLA (de *Very Large Array*), gentilmente cedidas por Preeti Karb. Veja como a estrutura rádio segue o braço espiral a leste, sugerindo uma relação entre o gás emissor e a estrutura rádio.

Na Fig.3.3 apresentamos mapas de razões entre linhas de emissão. O painel superior esquerdo mostra a distribuição da razão $H\alpha/H\beta$, assim como os valores de avermelhamento derivados $E(B-V)$, sob a suposição de que o valor intrínseco (a partir da física atômica) de $H\alpha/H\beta = 3.1$ não são avermelhadas (Osterbrock, 1989). Usando a lei de avermelhamento de Cardelli, Clayton & Mathis (1989) (Eq. 3.1) obtemos o mapa de avermelhamento mostrado na Fig. 3.4. Os maiores valores de avermelhamento ($E(B-V) \sim 0.4$) são observados em $\sim 0.3''$ a sudoeste, a oeste (na localização do braço menos estendido) e a sudeste do núcleo, enquanto as menores razões, que praticamente não indicam avermelhamento, são observadas a $\sim 1''$ do núcleo, no braço espiral a leste.

$$E(B - V) = 2.22 \log \frac{\left(\frac{H\alpha}{H\beta}\right)}{3.1} \quad (3.1)$$

O painel superior direito da Fig.3.3 mostra que ao longo da parte central dos braços espirais, a razão $[N II]6584/H\alpha$ é quase constante em ~ 1 , aumentando para valores maiores (~ 1.5) em direção as bordas dos braços. Os valores são típicos de ionização de AGN.

Usamos a razão das linhas de emissão de $[S II]$ (painel inferior esquerdo da Fig.3.3) para calcular a densidade do gás (Osterbrock, 1989). Os maiores valores de densidade ($\sim 900 \text{ cm}^{-3}$) são observados a $\sim 0.3''$ sudoeste do núcleo, aproximadamente na mesma localização do maior avermelhamento. Os valores de densidade diminuem até $\sim 500 \text{ cm}^{-3}$ ao longo de toda extensão do braço espiral a leste e até $\sim 400\text{--}100 \text{ cm}^{-3}$ ao longo do braço espiral menos extenso a oeste.

A razão $[O III]5007/H\beta$ (painel inferior direito da Fig.3.3) mostra valores típicos de LINER, com os maiores valores de ~ 4 no núcleo e ao longo de uma faixa estreita aproximadamente perpendicular aos braços espirais. Os menores valores de ~ 1.3 são observados a $\sim 1''$ ao leste,

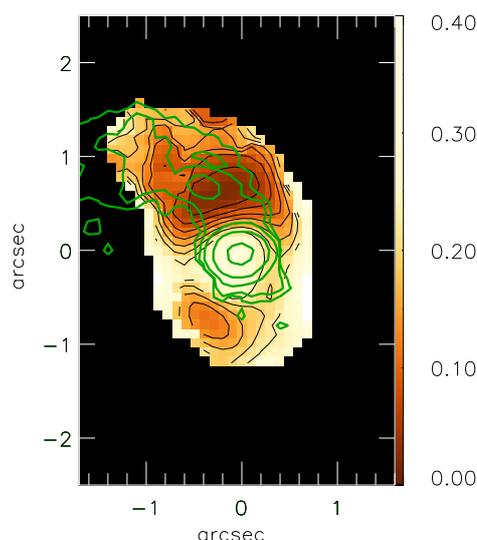


Figura 3.4: Mapa de avermelhamento, com valores de $E(B-V)$, obtido a partir da razão $H\alpha/H\beta$. Quanto menor o valor de $E(B-V)$, menor o avermelhamento.

no “meio” do braço espiral a leste, enquanto a oeste, a $\sim 0.5''$ do núcleo, há uma pequena região com valores de ~ 2 .

3.2 Diagramas Diagnóstico

Diagramas diagnóstico foram introduzidos por Baldwin et al. (1981), visando classificar objetos pelas relações entre razões de fluxo nas linhas de emissão. Esses diagramas são conhecidos como diagramas BPT (de *Baldwin-Phillips-Terlevich*), ou mesmo por diagramas “asas de gaivota” (Stasińska et al., 2010). Os diagramas BPT são usados para classificar empiricamente as regiões emissoras como região HII (com alta formação estelar), núcleo LINER ou Seyfert. Essa classificação depende da relação entre as razões de linhas, levando-se em conta se a linha é de fraca ou forte ionização. Quatro razões de linhas são usadas para gerar um diagrama diagnóstico tipo BPT: $[O\ III] \lambda 5007/H\beta$, $[N\ II] \lambda 6584/H\alpha$, $[S\ II] \lambda 6717/H\alpha$, $[O\ I] \lambda 6300/H\alpha$. Na Fig.3.5 usamos as três últimas razões em função da primeira, em escala logarítmica. Cada ponto em cinza do diagrama é um núcleo galáctico, de forma a ilustrar a classificação de galáxias, de acordo com dados obtidos pelo survey SDSS (de *Sloan Digital Sky Survey*). Os pontos coloridos representam pontos distintos da galáxia Arp 102B. Os pontos em azul estão localizados dentro de um raio de 0.5 arcsec (ou 245 pc) do núcleo central. Os pontos em vermelho estão localizados entre 0.5 e 1 arcsec do núcleo central. Já os pontos em preto estão localizados entre 1 e 1.5 arcsec.

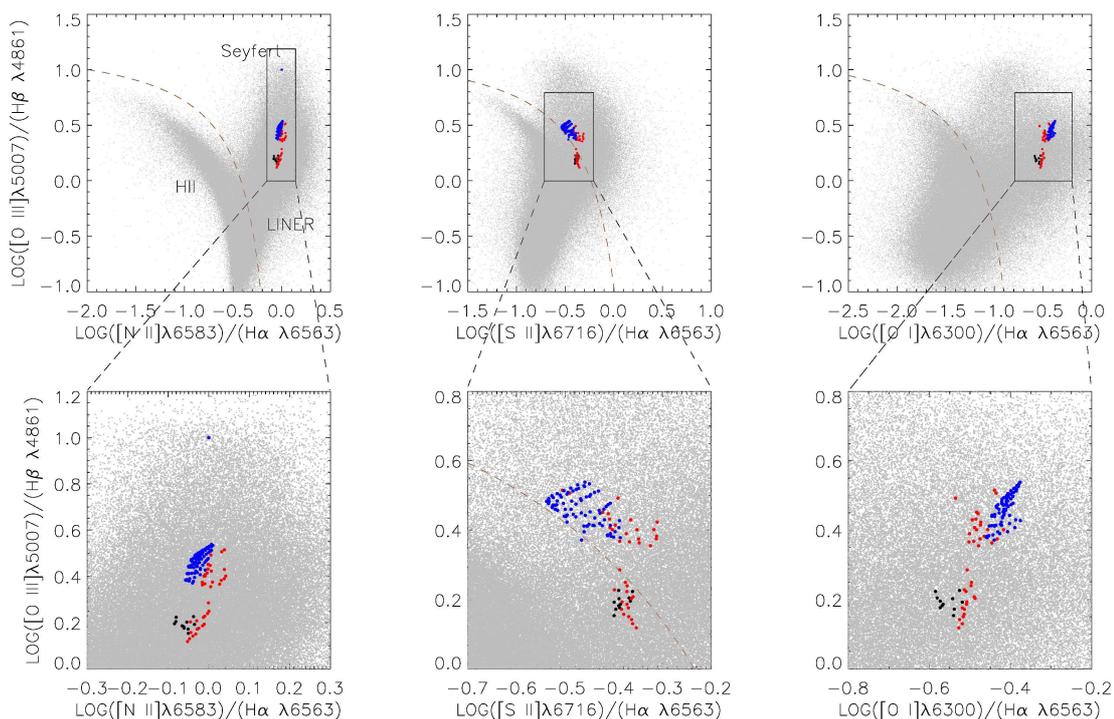


Figura 3.5: Diagramas diagnóstico, utilizando a razão $[O\ III]/H\beta$ em função das razões $[N\ II]/H\alpha$, $[S\ II]/H\alpha$ e $[O\ I]/H\alpha$. A linha tracejada divide galáxias tipo região HII (à esquerda) de AGNs (à direita). Pontos cinzas representam razões de galáxias observadas pelo SDSS. Pontos coloridos representam razões de pontos diversos da galáxia Arp 102B (azuis: até 0.5 arcsec do núcleo; vermelhos: entre 0.5 e 1.0 arcsec; pretos: entre 1.0 e 1.5 arcsec).

Utilizando curvas de classificação de Kewley et al. (2006), vemos que as galáxias tipo HII se localizam à esquerda da linha tracejada e AGNs à direita, para todos os diagramas. Entre os AGNs, galáxias com altos valores da razão $[O\ III]\ \lambda\ 5007/H\beta$ são classificadas como Seyfert, e galáxias com razões baixas são classificadas como LINERs. Em dois dos três diagramas observamos que as razões ficam todas na região de AGNs, com valores das razões de $[O\ III]\ \lambda\ 5007/H\beta$ intermediários entre Seyfert e LINER. Nota-se que os pontos azuis ficam mais próximos às regiões das Seyfert indicando que o gás mais próximo do núcleo tem uma maior excitação que o gás mais distante, que tem espectro tipo LINER. Isto é explicado pelo maior fluxo ionizante que atinge as regiões mais próximas, enquanto que as regiões mais distantes recebem um fluxo mais diluído.

3.3 Cinemática do Gás

As velocidades do gás foram obtidas dos comprimentos de onda correspondentes ao centróides das gaussianas ajustadas aos perfis das linhas de emissão (Eq. 3.2), enquanto que as dispersões

de velocidade σ foram obtidas da FWHM das gaussianas (Eq. 3.3).

$$v = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} c \quad (3.2)$$

$$\sigma = \frac{FWHM}{2.355\lambda_0} c \quad (3.3)$$

Na Fig.3.6 apresentamos os mapas de dispersão de velocidade (painéis a esquerda) e mapas de velocidade centróide (painéis a direita) para o gás emissor em $H\alpha$, [O III] e [S II]. Os valores de velocidade centróide foram obtidos a partir da subtração da velocidade radial da galáxia ($7216.62 \text{ km s}^{-1}$), que foi calculado fazendo uma média das medidas de velocidade do campo de 3×3 pixels centrais nas linhas $H\alpha$, [N II] λ 6584 e [O III] λ 5007. O campo de velocidades de [N II] é muito similar ao do $H\alpha$, logo não o apresentamos. Os mapas de velocidade centróide (painéis a direita da Fig.3.6) mostram redshifts a oeste, indicando que nesta região o gás se afasta, e blueshifts a leste, indicando que nesta região o gás se aproxima em relação ao núcleo. Reconhecemos nestes campos de velocidade um padrão de rotação distorcido, o qual pode ser originado de uma combinação de movimento de rotação num plano com ejeção de gás a partir do núcleo.

As maiores dispersões de velocidade ($\sim 270 \text{ km s}^{-1}$) são observadas ao redor do núcleo e a sudeste (a esquerda do núcleo nas figuras) para $H\alpha$ e [O III], enquanto valores baixos, até $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ são observados em outros pontos. No caso do [S II], os valores são um pouco mais baixos.

Contornos em verde mostram que a estrutura rádio é mais associada com a emissão em blueshift, enquanto regiões de maiores dispersões de velocidade são encontradas nos limites ao sul da estrutura radio e pode ser devido a turbulência induzida pelo jato radio.

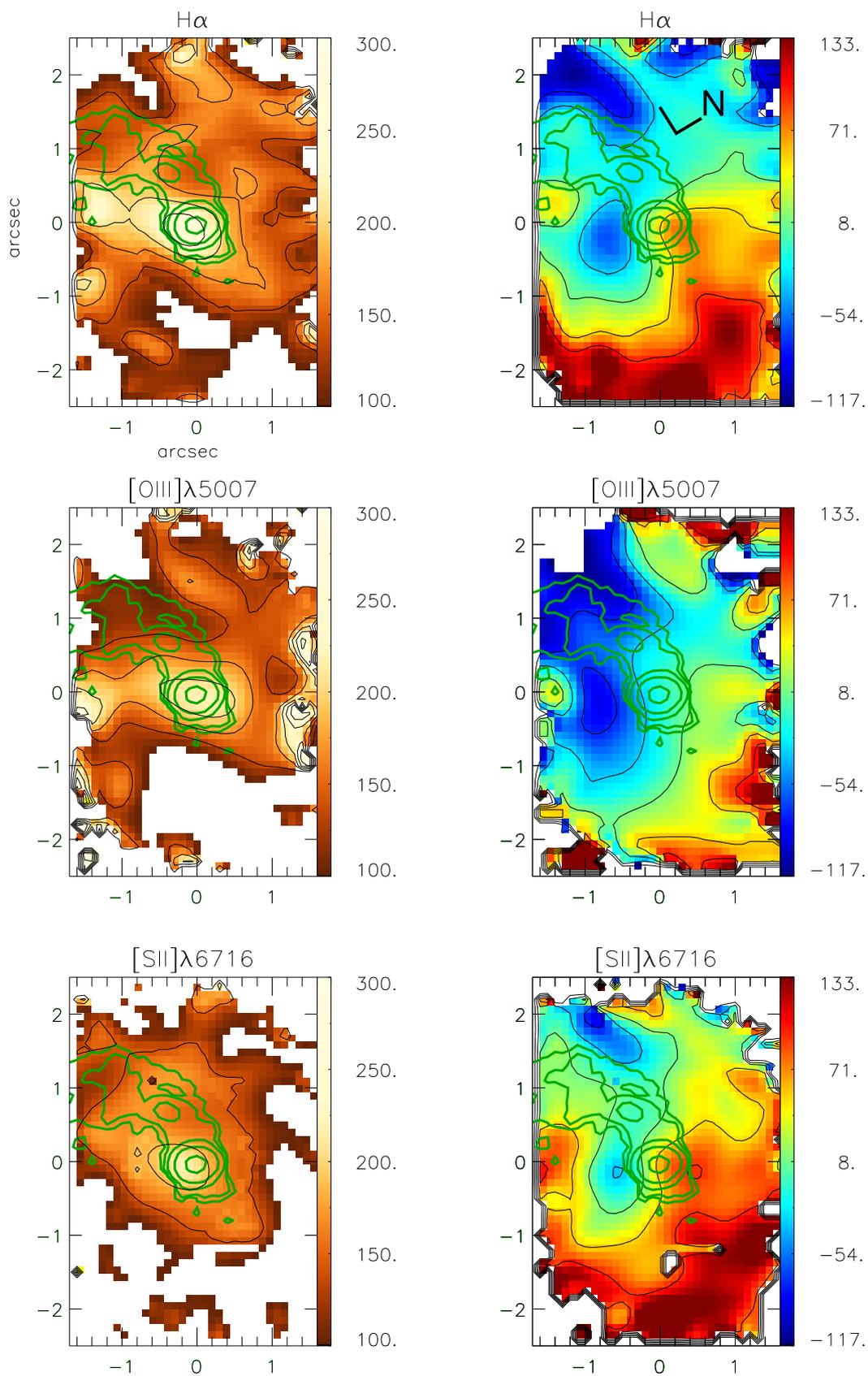


Figura 3.6: Mapas de dispersão de velocidade (painéis a esquerda) e velocidade centróide (painéis a direita) para linhas de emissão especificadas. Unidades em km s^{-1} .

4 DISCUSSÃO

O braço espiral previamente observado com o Hubble está também presente nas nossas observações com o Gemini, em particular nos mapas de fluxo nas linhas de emissão. Vemos também um padrão de rotação distorcido nos mapas das velocidades centróides, sendo a distorção provavelmente devida ao jato rádio. Mapas de dispersões de velocidade sugerem uma possível turbulência gerada por este jato em interação com o gás nas proximidades do núcleo, tornando o cenário físico um tanto complexo. Para tentar obter mais informações sobre esta cinemática, é interessante analisar como se comporta o gás em diferentes velocidades, e onde está localizado, assim como outras possíveis contribuições mascaradas pelos principais componentes de emissão. Isso pode ser feito usando os mapas de fluxo extraídos em “camadas de velocidades”, *channel maps*, e a técnica de análise de componentes principais PCA, respectivamente.

4.1 Channel Maps

Mapeamos a cinemática do gás usando *channel maps*, que mostram uma sequência de mapas de fluxo extraídas em intervalos de velocidade de $\sim 42 \text{ km s}^{-1}$ ao longo do perfil de linha de emissão em $\text{H}\alpha$ e de $\sim 83 \text{ km s}^{-1}$ ao longo do perfil de $[\text{O III}]$. Na Fig.4.1 apresentamos *channel maps* para $\text{H}\alpha$, e na Fig.4.2 para $[\text{O III}]\lambda 5007$. Ambas mostram os maiores valores de blueshift e redshift no núcleo, provavelmente apenas uma consequência da alta dispersão de velocidade observada nesse ponto, a qual é consideravelmente mais alta em $[\text{O III}]$ do que em $\text{H}\alpha$. Não mostramos *channel maps* para velocidades maiores que 350 km s^{-1} (chegam até 800 km s^{-1} para $[\text{O III}]$) já que isto corresponde apenas às altas dispersões de velocidade no núcleo. Blueshifts de até -165 km s^{-1} são observados ao longo do braço espiral a leste, estendendo até $1.4''$ do núcleo, enquanto redshifts de até 258 km s^{-1} são observados ao longo do braço espiral a oeste, também chegando a $1.4''$ do núcleo.

Os contornos em verde sobrepostos as *channel maps* são da imagem em rádio, indicando uma correlação entre a emissão rádio e regiões de blueshift, para $\text{H}\alpha$ e $[\text{O III}]$.

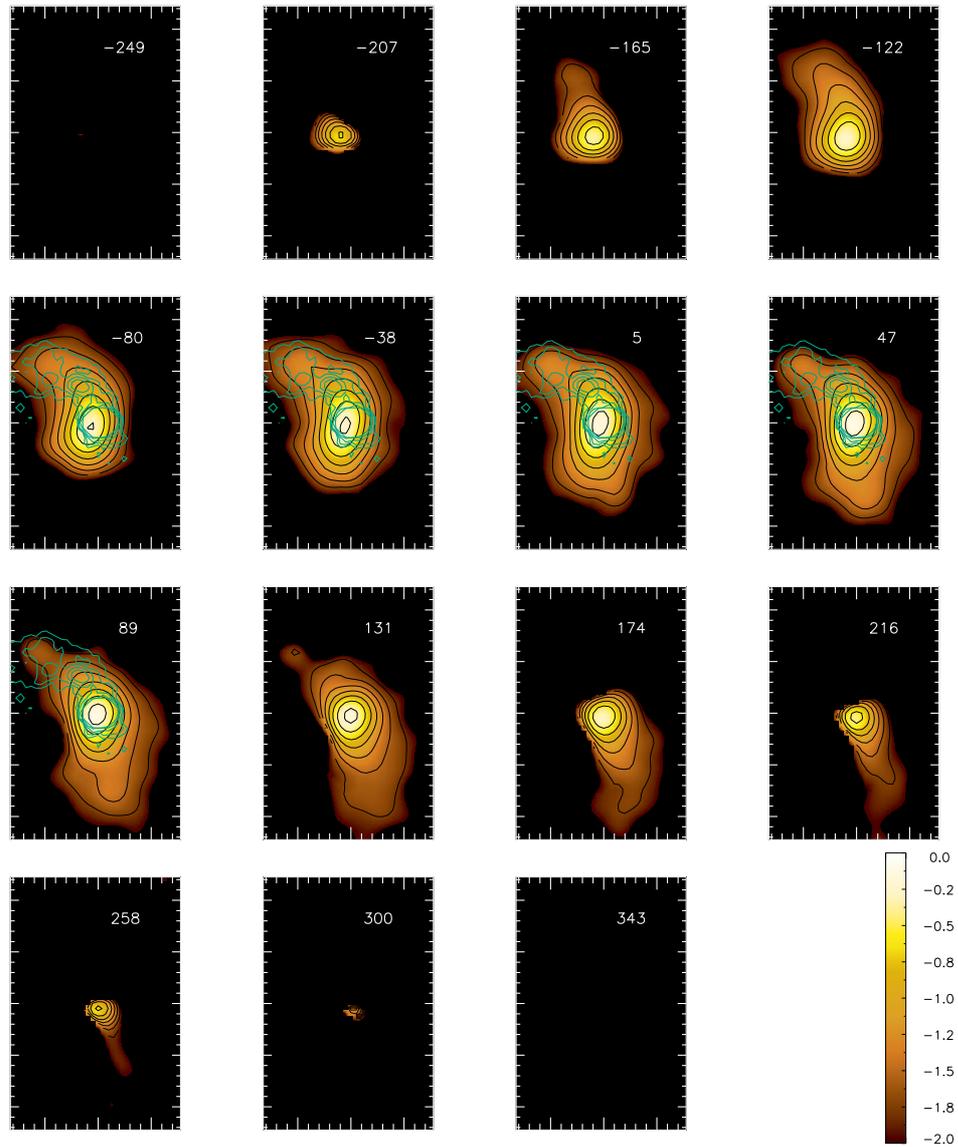


Figura 4.1: *Channel maps* ao longo do perfil de linha de emissão do gás em H α , em ordem crescente de velocidades (unidades de km s⁻¹). Unidades de fluxo são $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ spaxel}^{-1}$ e são mostradas em escala logarítmica. Pode-se ver que o que parece um outro braço do lado oposto do núcleo aparece em redshifts.

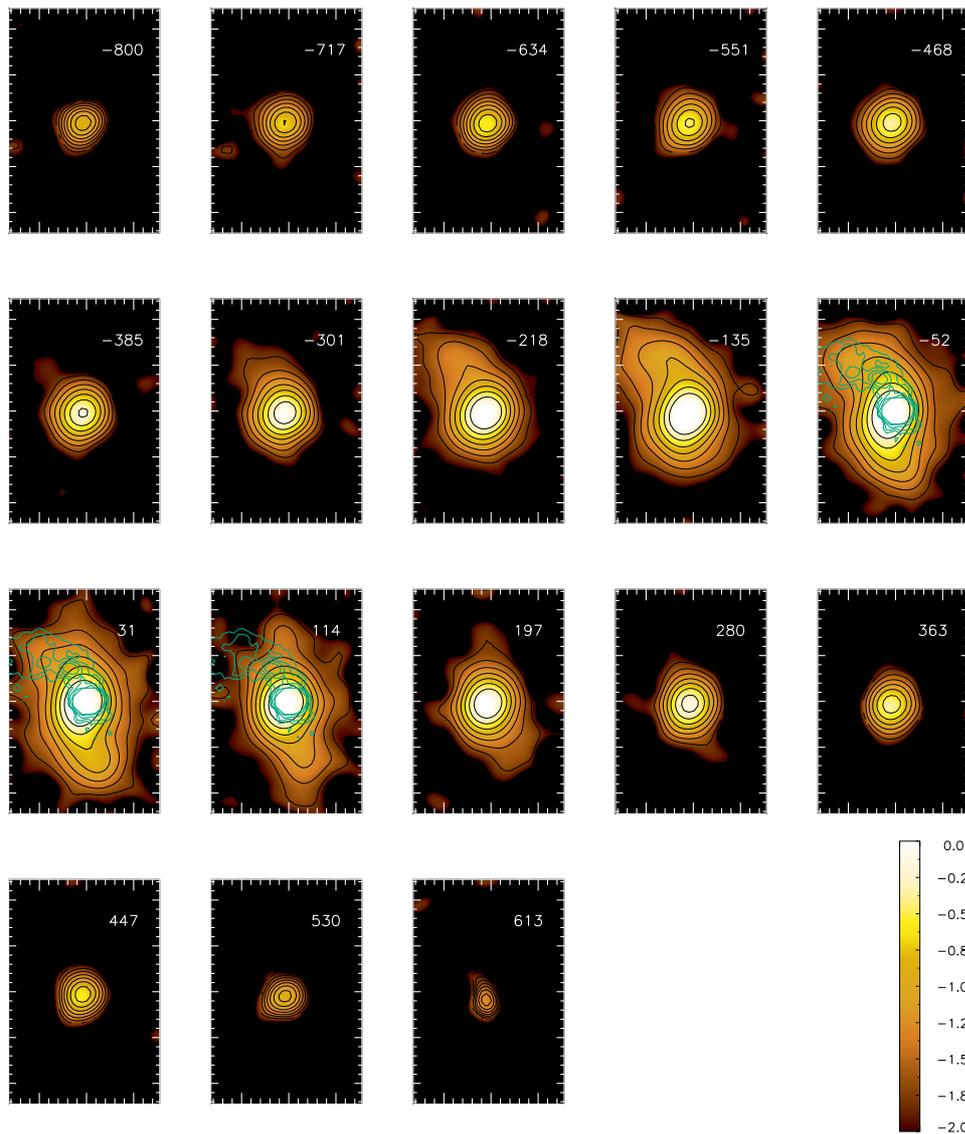


Figura 4.2: *Channel maps* ao longo do perfil de linha de emissão do gás em $[\text{O III}]\lambda 5007$, em ordem crescente de velocidades (unidades de km s^{-1}). Unidades de fluxo são $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ spaxel}^{-1}$ e são mostradas em escala logarítmica.

4.2 Análise PCA

Para tentarmos extrair mais informação da complexa cinemática do gás na região nuclear, usamos a técnica de *Principal Component Analysis* (PCA), a qual tem sido aplicada recentemente com sucesso para revelar características em pequenas escalas em torno do AGN por Steiner et al. (2009). A PCA é aplicada diretamente ao cubo de dados calibrado e separa a informação, apresentado originalmente num sistema de coordenadas correlacionadas, em um sistema de coordenadas não-correlacionadas ordenadas pelas componentes principais de variância decrescente. Essas novas coordenadas chamadas de “autoespectros” revelam correlações e anti-correlações espaciais nos dados. A projeção dos dados nessas novas coordenadas produz imagens chamadas “tomogramas”, as quais mapeam a distribuição espacial do autoespectro.

O resultado da Análise PCA é mostrado na Fig.4.3. Dos painéis superiores aos inferiores, mostramos os tomogramas (à esquerda) e respectivos autoespectros (à direita), em ordem de variância decrescente.

A componente PC1, que carrega a maior parte da variância (97.9%), mostra um autoespectro dominado pela contribuição das linhas de emissão do AGN, que tem valores positivos no autoespectro e corresponde às cores vermelha até azul clara no tomograma.

A componente PC2 é dominada pelas linhas largas, que vem da região em vermelho no tomograma.

A componente PC3 mostra um resultado interessante: as linhas estreitas estão anti-correlacionadas com a componente larga de $H\alpha$. Esta componente larga aparece em vermelho no tomograma, correspondendo aos valores positivos. Já as linhas estreitas, que são negativas no autoespectro, aparecem no tomograma como se originando em regiões aproximadamente co-espaciais ao jato rádio.

Finalmente a componente PC4 apresenta no auto-espectro as linhas estreitas com componentes em blueshift (valores negativos) anti-correlacionadas com as componentes em redshift (valores positivos). O tomograma mostra que a componente em blueshift encontra-se à esquerda e a em redshift à direita do núcleo. Esta estrutura pode ser interpretada como devida a um outflow bipolar ou a um disco de rotação. Favorecemos a última hipótese pelo fato de que o jato rádio – usualmente associado a ejeções de matéria a partir do núcleo – está orientado perpendicularmente a esta estrutura. Este disco em rotação pode ser o agente de alimentação do núcleo ativo.

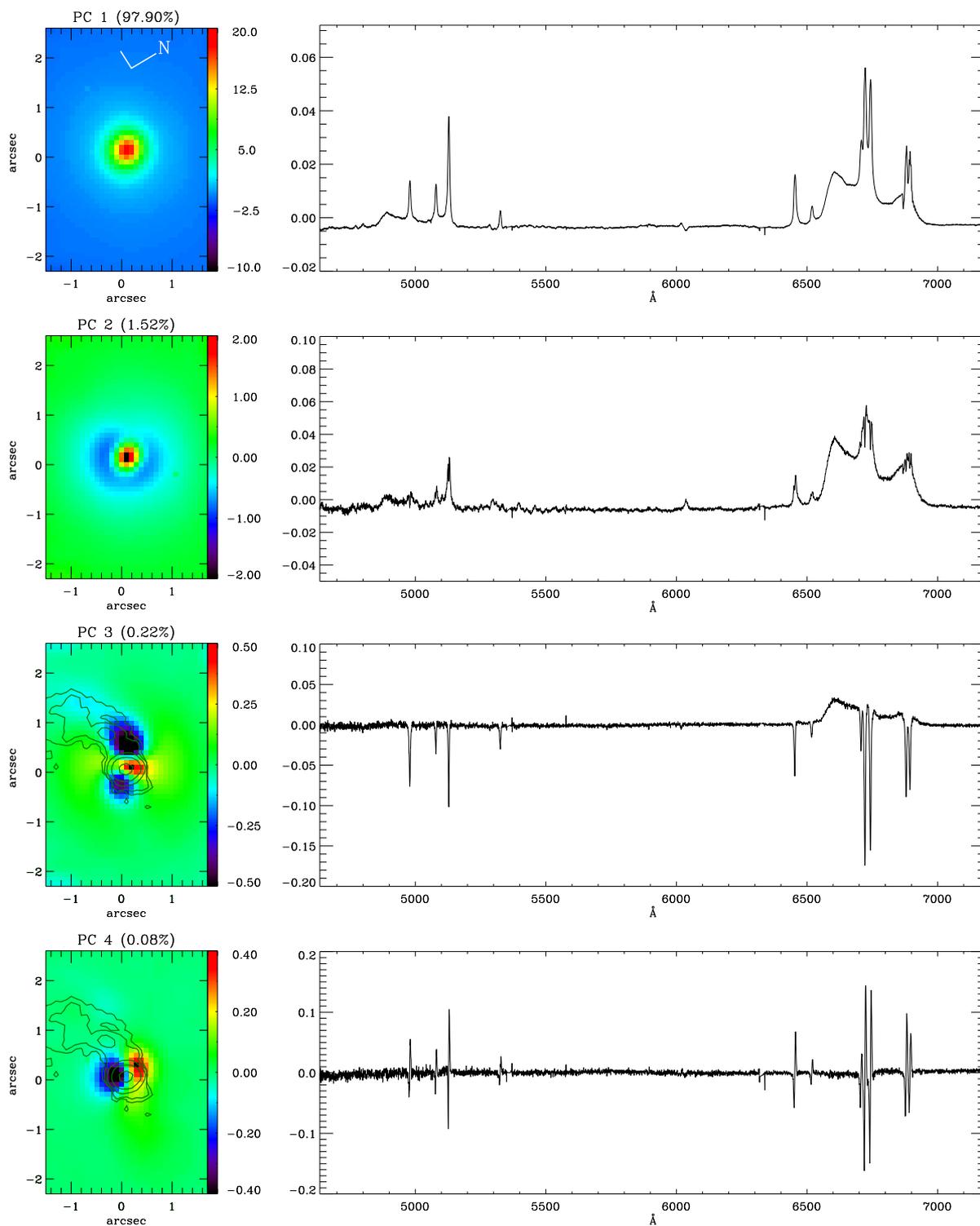


Figura 4.3: Resultados da Análise PCA. De cima para baixo: tomogramas (esquerda) e autoespectros correspondentes às PC1, PC2, PC3 e PC4 em ordem decrescente de variância.

5 CONCLUSÕES

Mapas de fluxo em todas as linhas de emissão mostram o mesmo padrão espiral observado na imagem do HST em $H\alpha$ e se estendem até pelo menos 1kpc do núcleo. A excitação do gás é dominada pelo AGN com razões de linha de emissão típicas de LINER, mas com menor excitação a nordeste, o que sugere possível contribuição de formação estelar. A cinemática do gás revela um padrão de rotação distorcido sugerindo contribuição de outflows; a evidência mais forte de outflow é observada em [O III], onde a região de blueshift é correlacionada com a estrutura rádio. Sugerimos que os braços espirais não são agentes de transporte de matéria ao AGN como inicialmente sugerido, mas sim o resultado da interação de um jato rádio com o meio interestelar da galáxia, combinado com a rotação do gás no plano da galáxia.

A análise do cubo de dados através da técnica PCA revela também a contribuição de uma outra estrutura cinemática: um possível disco de rotação, orientado perpendicularmente ao braço rádio. Este disco pode ser o agente que alimenta o núcleo ativo.

Este trabalho teve como objetivo principal o aprendizado de técnicas de medidas e análise de dados. O trabalho ainda está em andamento, visando aprimorar a interpretação física e a compreensão da complexa cinemática de gás da galáxia Arp102 B.

REFERÊNCIAS

- Allington-Smith, J.; Murray, G.; Content, R.; Dodsworth, G.; Davies, R.; Miller, B.W.; Jorgensen, I.; Hook, I.; Crampton, D.; Murowinski, R. (2002) *Integral Field Spectroscopy with the Gemini Multiobject Spectrograph. I. Design, Construction, and Testing*. PASP, 114, 892
- Antonucci, R. (1993) *Unified models for active galactic nuclei and quasars*. ARA&A, 31, 473
- Baldwin, J.A.; Phillips, M.M.; Terlevich, R. (1981) *Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects*. PASP, 93, 5
- Cardelli, J.A., Clayton, G.C., & Mathis, J.S. (1989) *The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction*. ApJ, 345, 245
- Chen, K., Halpern, J.P., & Filippenko, A.V. (1989) *Kinematic evidence for a relativistic Keplerian disk - ARP 102B*. ApJ, 339, 742
- Chen, K. & Halpern J.P. (1989) *Structure of line-emitting accretion disks in active galactic nuclei - ARP 102B*. ApJ, 344, 115
- Eracleous, M. & Halpern, J.P. (2004) *Accurate Redshifts and Classifications for 110 Radio-Loud Active Galactic Nuclei*. ApJ, 150, 181
- Fathi, K.; Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R.A.; Winge, C.; Axon, D.J.; Robinson, A.; Capetti, A.; Marconi, A. (2006) *Streaming Motions toward the Supermassive Black Hole in NGC 1097*. ApJ, 641, L25
- Lucy, L.B. (1974) *An iterative technique for the rectification of observed distributions*. AJ, 79, 745
- Kewley, L.J.; Groves, B.; Kauffmann, G.; Heckman, T. (2006) *The host galaxies and classification of active galactic nuclei*. MNRAS, 372, 961
- Maciejewski, W. (2004) *Nuclear spirals in galaxies: gas response to an asymmetric potential - I. Linear theory, II. Hydrodynamical models*. MNRAS, 354, 883
- Oke, J.B. (1987) *Emission-line profile changes in 3C 390.3*. Superluminal Radio Sources, 267
- Osterbrock, J.B. (1989) *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*.
- Perez, E., Penston, M. V., Tadhunter, C., Mediavilla, E. & Moles, M. (1988) *An accretion disc in the broad-line radio galaxy 3C 390.3?*. MNRAS, 230, 353

- Peterson, B.M. (1997) *An introduction to active galactic nuclei*.
- Richardson, W.H. (1972) *Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration*. JOSA, 62,
- Riffel, R.A. (2010) *profit: a new alternative for emission-line profile fitting*. AP&SS, 327, 239
- Stasińska, G.; Vale Asari, N.; Cid Fernandes, R. (2010) *Beware of Fake AGNs*. Co-Evolution of Central Black Holes and Galaxies, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 267, 141
- Stauffer, J., Schild, R., & Keel, W.C. (1983) *ARP 102B - A new and unusual broad-line galaxy*. ApJ, 270, 465
- Steiner, J.E.; Menezes, R.B.; Ricci, T.V.; Oliveira, A.S. (2009) *Title: PCA Tomography: how to extract information from datacubes*. MNRAS, 395, 66
- Storchi-Bergmann, T., Baldwin, J.A., Wilson, A.S. (1993) *Double-peaked broad line emission from the LINER nucleus of NGC 1097*. ApJ, 410, L11
- Storchi-Bergmann, T.; Nemmen da Silva, R.; Eracleous, M.; Halpern, J.P.; Wilson, A.S.; Filippenko, A.V.; Ruiz, M.T.; Smith, R.C.; Nagar, N.M. (2003) *Evolution of the Nuclear Accretion Disk Emission in NGC 1097: Getting Closer to the Black Hole*. ApJ, 598, 956
- Storchi-Bergmann, T.; Dors, O.L., Jr.; Riffel, R.A.; Fathi, K.; Axon, D.J.; Robinson, A.; Marconi, A.; Östlin, G. (2007) *Nuclear Spirals as Feeding Channels to the Supermassive Black Hole: The Case of the Galaxy NGC 6951*. ApJ, 670, 959
- Urry, C.M.; Padovani, P. (1995) *Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei*. PASP, 107, 803