

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA

**Cinemática do gás na região circumnuclear de
galáxias ativas**

Allan Schnorr Müller

Dissertação realizada sob orientação da Professora Dra. Thaisa Storchi Bergmann e apresentada ao Instituto de Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física.

Porto Alegre

Abril, 2009

Agradecimentos

- Aos meus pais, Sergio e Marina, ao meu irmão, Charles, e à minha namorada, Ana Carolina, pelo incentivo e apoio, que foram essenciais para a realização deste trabalho;
 - À Thaisa pela competente orientação e por todo conhecimento transmitido;
 - Ao colega Rogemar pela ajuda e sugestões;
- Enfim, agradeço a todos que colaboraram na realização deste trabalho.

Allan Schnorr Müller

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Abril 2009

Resumo

Apresentamos mapas bidimensionais (2D) para a cinemática do gás na região central (algumas centenas de parsecs) das galáxias ativas NGC 1566, M 81, NGC 3982 e NGC 4450, e para a cinemática estelar para a galáxia M 81. As observações foram feitas com a Unidade de Campo Integral (IFU) do GMOS (Gemini Multi-Object Spectrograph) nos telescópios Gemini. Obtivemos campos de velocidades e mapas de dispersão de velocidades pelo ajuste das linhas de emissão do gás $H\alpha$, $[NII] \lambda 6584$ e $[SII] \lambda \lambda 6717, 31$. Nosso objetivo foi procurar a assinatura de movimentos de queda do gás em direção ao núcleo da galáxia para alimentar o buraco negro central. Para a galáxia NGC 1566, foi possível ajustar um modelo de rotação para o gás no plano da galáxia, o que possibilitou a construção de um mapa de resíduos através da subtração do campo de velocidades modelado do campo de velocidades do gás. Nós comparamos estes mapas de resíduos e dispersão de velocidades com mapas de estrutura, construídos a partir de observações com o telescópio espacial Hubble, em busca de uma relação entre os filamentos de poeira vistos nos mapas de estrutura e fluxos de gás, no intuito de testar a hipótese de que espirais nucleares são canais pelos quais a matéria é levada de escalas galácticas até a região nuclear para alimentar o buraco negro central. Para a galáxia M 81, foi possível obter o campo de velocidades estelar, que foi subtraído do campo de velocidades do gás para isolar movimentos não circulares. Para as demais galáxias, o campo de velocidades e o mapa de dispersão de velocidades foram comparados diretamente ao mapa de estrutura, uma vez que não foi possível ajustar um modelo de rotação no plano. Todas as galáxias mostram associação entre movimentos não circulares e aumentos de dispersão de velocidades com filamentos escuros observados nos mapas de estrutura. Além disso, estimamos a taxa de acreção necessária para reproduzir a luminosidade do núcleo e, também, a massa do buraco negro central para todas as galáxias da amostra e, no caso de NGC 1566 e M 81, estimamos também a taxa de *inflow* de gás em regiões onde encontramos fluxos de gás em direção ao núcleo e comparamos esta taxa com a taxa de acreção.

Sumário

Agradecimentos	i
Sumário	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Figuras	vi
1 Introdução	1
1.1 Modelo unificado	2
1.2 Alimentação do buraco negro central	3
1.3 Objetivos do trabalho	6
2 Amostra e Observações	7
2.1 A amostra	7
2.1.1 NGC 1566	7
2.1.2 M 81	8
2.1.3 NGC 3982	8
2.1.4 NGC 4450	9
2.2 Observações	9
2.3 Redução de dados	10
2.4 Metodologia	11
2.4.1 Medida das linhas de emissão	11
2.4.2 O modelo de rotação	11
3 Resultados: A galáxia NGC 1566	14
3.1 A cinemática do gás	17
3.2 Taxa de acreção de massa ao núcleo ativo	24

3.3	Estimativa da massa do buraco negro central	25
4	Resultados: A galáxia M 81	27
4.1	A cinemática do gás	29
4.2	A cinemática estelar	32
4.3	Comparação entre a cinemática do gás e das estrelas.	34
4.4	Taxa de acreção de massa ao núcleo ativo	36
4.5	Estimativa da massa do buraco negro central	38
5	Resultados: A galáxia NGC 3982	39
5.1	A cinemática do gás	42
5.2	Estimativa da massa do buraco negro central e da taxa de acreção . .	43
6	Resultados: A galáxia NGC 4450	44
6.1	A cinemática do gás	45
6.2	Estimativa da massa do buraco negro central e da taxa de acreção . .	48
7	Considerações Finais	50
7.1	Sumário e Conclusões	50
7.2	Perspectivas	53
	Referências Bibliográficas	54

Lista de Tabelas

2.1	Detalhes das observações	9
3.1	Parâmetros resultantes do ajuste do modelo cinemático a NGC 1566.	17

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática do modelo unificado para AGNs	4
2.1	Modelo de rotação em torno de um potencial de Plummer	12
3.1	Imagem em grande escala, mapa no contínuo e espectros de NGC 1566	15
3.2	Campo de velocidades e mapas de estrutura, dispersão de velocidades e resíduos para NGC 1566	19
3.3	Campo de velocidades e mapas de estrutura, dispersão de velocidades e resíduos para NGC 1566	20
3.4	Comparação entre mapa de resíduos e emissão em O III em NGC 1566	23
4.1	Imagem em grande escala, mapa no contínuo e espectros de M 81 . .	28
4.2	Campo de velocidades e mapas de estrutura e dispersão de velocidade para M 81	30
4.3	Campo de velocidades estelar e dispersão de velocidade estelar para M 81	32
4.4	Campo de velocidades estelar, dispersão de velocidade e mapa de resíduos para M 81	35
5.1	Imagem em grande escala, mapa no contínuo e espectros de NGC 3982	40
5.2	Campo de velocidades e mapas de estrutura e dispersão de velocidade para NGC 3982	41
6.1	Imagem em grande escala, mapa de estrutura, mapa no contínuo e espectros de NGC 4450	46
6.2	Campo de velocidades e mapas de estrutura e dispersão de velocidade para NGC 4450	47

Capítulo 1

Introdução

O termo Galáxias com núcleo ativo (“*Active Galactic Nuclei*”, ou AGN) refere-se a galáxias nas quais a energia proveniente do núcleo não pode ser somente atribuída à emissão de estrelas. Galáxias Seyfert, QUASARES (*quasi-stellar radio sources*), LINERS (*low-ionization nuclear emission-line region*) e rádio-galáxias são exemplos de subclasses de AGNs (Peterson 1997).

Galáxias Seyfert devem seu nome a Carl Seyfert, que foi o primeiro (Seyfert 1943) a notar que haviam várias galáxias que apresentavam características similares e formavam um grupo diferenciado. As características que levaram Seyfert a selecionar estas galáxias incluíam o alto brilho superficial e aparência estelar de seu núcleo, cujos espectros óticos eram dominados por linhas de emissão de alta ionização e excitação, incluindo linhas permitidas e proibidas (aquelas que não são observadas em laboratório). Ele observou que as linhas destes espectros eram largas e, em alguns casos, as linhas permitidas (dominadas por emissão do hidrogênio) eram mais largas do que as outras.

As galáxias Seyfert se dividem em dois tipos: Seyfert 1 e Seyfert 2. Como diferenças, podemos citar que as galáxias Seyfert 1 apresentam duas componentes nas

linhas de emissão permitidas, uma apresentando largura semelhante a observadas em galáxias com formação estelar ($\lesssim 500 \text{ km s}^{-1}$), característica de um gás ionizado de baixa densidade eletrônica, e outra com larguras de aproximadamente 5000 km s^{-1} , observada apenas em linhas permitidas, indicativa de um gás emissor de alta densidade eletrônica ($> 10^9 \text{ cm}^{-3}$). A região que produz as linhas largas é conhecida como *Broad Line Region* (daqui para frente chamada BLR), enquanto que a região que produz as linhas mais estreitas é chamada de *Narrow Line Region* (daqui para frente chamada NLR). Além disso, nas galáxias Seyfert 1, o contínuo é dominado por uma componente espectral tipo lei de potência. Por outro lado, nos espectros de galáxias Seyfert 2, há apenas linhas de emissão estreitas e o contínuo é dominado por um espectro estelar composto e não é tão brilhante quanto o das galáxias Seyfert 1.

O termo LINER (*low-ionization nuclear emission-line region*), por sua vez, refere-se a um tipo de núcleo ativo, que, como indicado pelo seu nome, tem um espectro dominado por linhas de emissão de baixa ionização. Quando comparado ao espectro de um típico núcleo Seyfert, linhas como [O II] $\lambda 3727 \text{ \AA}$, [O I] $\lambda 6300 \text{ \AA}$, [N II] $\lambda 6585 \text{ \AA}$ e [S II] $\lambda\lambda 6718, 6731 \text{ \AA}$ são relativamente mais fortes quando comparadas com as linhas do [O III] $\lambda 5007 \text{ \AA}$, [Ne III] $\lambda 3869 \text{ \AA}$ e He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$, que são relativamente mais fracas. Esta classe de AGN foi identificada pela primeira vez por Timothy Heckman no terceiro de uma série de artigos sobre espectros de núcleos galácticos publicados em 1980 (Heckman 1980).

1.1 Modelo unificado

É de ampla aceitação, atualmente, a idéia de que a energia emitida por um AGN é produzida pela acreção de matéria a um buraco negro super massivo central, que transformaria energia gravitacional em energia térmica e eletromagnética em um disco

de acreção. Acredita-se que todas as galáxias que formam bojos formem também, em seu centro, um buraco negro supermassivo, cuja massa é proporcional à massa do bojo (Ferrarese & Merritt 2000, Gebhardt et al. 2000). Logo, galáxias ativas seriam aquelas em que o buraco negro central está acretando matéria, através de um disco de acreção, no presente.

A física do AGN é explicada pelo chamado Modelo Unificado (Urry & Padovani 1995). De acordo com este modelo, o AGN é formado por um buraco negro supermassivo central circundado por um disco de gás, o disco de acreção, cuja parte mais interna pode ser a origem de um jato de partículas. Circundando este disco, e atingindo dimensões que podem chegar a parsecs, o Modelo Unificado postula a existência de um toro de gás molecular e poeira. De acordo com o modelo, a BLR (região que produz as linhas largas) está localizada internamente ao toro, enquanto que a NLR, que produz as linhas estreitas, é externa ao toro, como esquematizado na figura 1.1.

O modelo unificado explica a origem das diferenças entre galáxias Seyfert 1 e Seyfert 2. Dependendo da orientação da linha de visada, tanto o contínuo nuclear quanto a BLR podem ser obscurecidos pelo toro, como pode ser visto na figura 1.1. Galáxias Seyfert 1 seriam, então, aquelas observadas de modo a receber luz tanto da BLR quanto da NLR. Já no caso das Seyfert 2, o toro, visto de perfil, obscurece a BLR, e devido a isso apenas linhas estreitas são observadas.

1.2 Alimentação do buraco negro central

Algumas questões, porém, ainda continuam em aberto, entre elas a natureza da alimentação do Buraco Negro. A idéia mais aceita atualmente é que a energia emitida é resultado da transformação de energia potencial gravitacional em radiação e energia

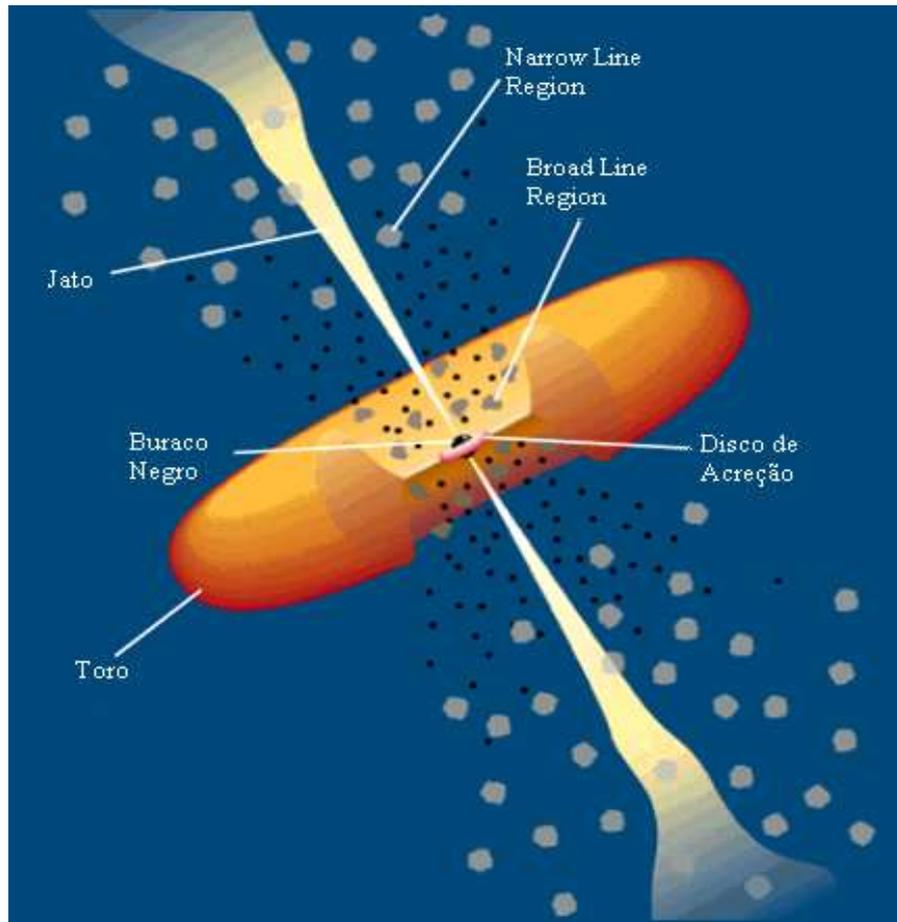


Figura 1.1: Figura de Urry & Padovani (1995) com modificações.

cinética dos jatos, através da acreção de matéria ao buraco negro central. Porém, para que isso ocorra, é necessário um reservatório de gás na região circumnuclear, a fim de alimentar o buraco negro. Simões Lopes et al. (2007), utilizando observações do telescópio espacial Hubble de uma amostra de galáxias *early-type*, com e sem atividade nuclear, encontraram que todas as galáxias ativas possuíam poeira circumnuclear, enquanto apenas 26% das galáxias não ativas apresentavam poeira. Esta presença de poeira implica também uma grande presença de gás nestas regiões.

Outra evidência de como ocorre a alimentação do buraco negro central é a detecção de fluxos de gás em direção ao núcleo (*inflows*) em galáxias ativas. Em grande escala, Adler & Westpfahl (1996) encontraram *inflows* de gás ao longo de

braços espirais da galáxia M 81 e Mundell & Shone (1999) encontraram *inflows* ao longo de uma barra na galáxia NGC 4151.

Há um grupo de pesquisadores, que em um esforço conjunto, criaram o NUGA project (cuja sigla significa NUClei of GALaxies, ver García-Burillo et al. (2003a)), com o objetivo de estudar o mecanismo de alimentação de diversos AGNs de baixa luminosidade. Estes pesquisadores tem procurado o agente responsável pelo fluxo de gás para as regiões centrais no potencial estelar. A eficiência deste potencial em remover momento angular do gás é quantificada deduzindo-se os torques gravitacionais exercidos pelo potencial no gás. Isto é feito observando-se a distribuição e cinemática do gás molecular na galáxia e utilizando-se imagens em alta resolução no ótico e infravermelho próximo, usadas para caracterizar o potencial estelar (García-Burillo et al. 2003b).

O estudo dos torques estelares revelou que estes ajudam a levar o gás para regiões mais internas, pois removem seu momento angular. Estes torques seriam então negativos. Entretanto, para regiões dentro de algumas poucas centenas de parsecs do núcleo, os torques gravitacionais passam a ser positivos e portanto não levam mais o gás em direção ao centro (García-Burillo et al. 2005). Outros mecanismos são, então, necessários para levar o gás até o AGN.

Inflows já foram observados em H_2 para as galáxias NGC 4051 (Riffel et al. 2008) e NGC 1068 (Sánchez et al. 2009). No caso de NGC 4051, Riffel et al. (2008), usando observações espectroscópicas na banda K obtidas com o *Near-infrared Integral Field Spectrograph* (NIFS) do Gemini, encontraram dois braços espirais, um observado em *blueshift* no lado distante da galáxia e outro observado em *redshift* no lado próximo da galáxia, identificados como agentes de *inflow* do gás em direção ao AGN.

Sánchez et al. (2009) observaram fluxos de matéria em direção ao núcleo em trajetórias altamente elípticas ou parabólicas, usando o espectrógrafo de campo integral no infravermelho próximo SINFONI.

Em comprimentos de onda óticos, nosso grupo foi pioneiro na identificação de *inflows* na região central das galáxias NGC 1097 (Fathi et al. 2006) e NGC 6951 (Storchi-Bergmann et al. 2007). Usando dados espectroscópicos obtidos com a unidade de campo integral (IFU) do telescópio Gemini, foi mapeado o campo de velocidades do gás ionizado na região central e foram detectados *inflows* de gás ao longo de braços espirais nucleares. Estes resultados no ótico e infravermelho próximo dão suporte a hipótese de que braços espirais nucleares são um mecanismo capaz de levar o gás para a parte interna das galáxias e alimentar o buraco negro central, desde escalas de aproximadamente 1 kpc até dezenas de parsecs do núcleo ativo.

1.3 Objetivos do trabalho

Neste trabalho, usamos uma amostra de galáxias selecionada a partir de Simões Lopes et al. (2007). Todas as galáxias escolhidas apresentam estruturas de poeira circumnuclear. Galáxias com estas características foram escolhidas com o intuito de estender o estudo iniciado nos trabalhos de Fathi et al. (2006) e Storchi-Bergmann et al. (2007) e melhor compreender a importância das estruturas espirais como agentes de transferência de matéria das partes externas às partes internas das galáxias para alimentar o buraco negro central.

Capítulo 2

Amostra e observações

Neste capítulo, discutimos a amostra de galáxias, as observações e os processos de redução e análise de dados.

2.1 A amostra

2.1.1 NGC 1566

NGC 1566 é uma galáxia espiral do tipo SABbc, de acordo com a classificação morfológica de Hubble, que se localiza a uma distância de ≈ 20 Mpc (valor obtido na base de dados do NED¹, assumindo $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), para qual $1''$ corresponde a ≈ 99 pc. Seu núcleo ativo é classificado como Seyfert 1 por Shobbrook (1966) devido ao espectro exibir um forte contínuo azul e linhas de emissão $H\beta$ e $H\gamma$ largas. As características espectrais, porém, apresentam variações ao longo do tempo, principalmente na intensidade das componentes largas das linhas $H\alpha$ e $H\beta$ (Pastoriza & Gerola 1970, Alloin et al. 1985), variando de tipo Seyfert 1.2, em sua fase mais ativa, a tipo Seyfert 1.9, em sua fase menos ativa (Alloin et al. 1985).

¹NASA/IPAC *Extragalactic Database* disponível em <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

Em grande escala, Agüero et al. (2004) observaram *inflows* próximos ao eixo menor da galáxia, que podem ser o mecanismo responsável por alimentar o núcleo ativo da galáxia. Em escalas nucleares, Schmitt & Kinney (1996) observaram uma emissão estendida em [O III], que pode estar relacionada a um *outflow*.

2.1.2 M 81

M 81 é uma galáxia espiral classificada como SAab. O núcleo ativo foi classificado como LINER por Heckman (1980) e como Seyfert 1 por Peimbert & Torres-Peimbert (1981), que observaram pela primeira vez uma componente larga de H α no espectro nuclear da galáxia. M 81 se localiza a uma distância de $\approx 3,5$ Mpc (Paturel et al. 2002), para qual 1'' corresponde a ≈ 17 pc na galáxia. Devereux et al. (2003), usando observações espectroscópicas dos 10 pc centrais da galáxia, obtidas com o STIS (*Space Telescope Imaging Spectrograph*) do telescópio espacial Hubble (daqui em diante HST), ajustaram um modelo cinemático ao campo de velocidades da linha [NII] $\lambda 6585$ Å e, com isso, conseguiram estimar a massa do buraco negro central como sendo de $7,0_{-1}^{+2} \times 10^7 M_{\odot}$.

2.1.3 NGC 3982

NGC 3982 é uma galáxia espiral do tipo SABb, localizada a uma distância de $\approx 17,5$ Mpc (valor obtido na base de dados do NED), para a qual um 1'' corresponde a ≈ 85 pc. O núcleo ativo da galáxia foi classificado como Seyfert 2 por Phillips et al. (1983).

2.1.4 NGC 4450

NGC 4450 é uma galáxia espiral do tipo SAab e se encontra a uma distância de $\approx 16,8$ Mpc (Ho et al. 1997), para a qual $1''$ equivale a ≈ 82 pc na galáxia. Seu núcleo ativo foi classificado como LINER tipo 1.9 por (Ho et al. 1997), baseado na detecção de uma fraca componente larga de $H\alpha$. Ho et al. (1997) também observaram que esta componente larga possui um pico duplo, que interpretaram como sendo a assinatura de um disco de acreção relativístico.

2.2 Observações

As observações foram feitas nos telescópios Gemini Sul, para a galáxia NGC 1566, e Gemini Norte, para as galáxias M 81, NGC 3982 e NGC 4450. A tabela 2.1 apresenta algumas informações sobre as observações.

Tabela 2.1: Detalhes das observações.

Galáxia observada	Tipo	Atividade	Data da observação	Tempo de exposição (s)	Número do projeto	PSF ($''$)
NGC 1566	SABbc	Seyfert 1	16/11/06	1531	GS-2006B-Q-40	0,9
M 81	SAab	Sey1/LINER	31/12/06	574	GN-2006B-Q-94	1,1
NGC 3982	SABb	Seyfert 2	01/01/07	1560	GN-2006B-Q-94	1,0
NGC 4450	SAab	LINER	03/01/07	1560	GN-2006B-Q-94	1,0

Para a aquisição dos dados, utilizamos o espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*) operando no modo IFU (*Integral Field Unit*). Neste modo de operação, pode-se obter até 1500 espectros simultaneamente, sendo 1000 no campo principal e mais 500 no campo de céu, que se encontra afastado por 1 minuto de arco do campo principal. Os campos principal e de céu são ambos formados por um arranjo hexagonal de lentes que cobrem $7'' \times 5''$ (campo principal) e $3,5'' \times 5''$ (campo de céu), no modo de duas fendas, e $3,5'' \times 5''$ e $1,75'' \times 5''$, respectivamente, no modo de uma fenda. Para este trabalho, todas as observações foram feitas no modo de duas fendas.

A luz que chega aos dois arranjos de lentes é levada por fibras óticas ao espectrógrafo, que possui dois sistemas óticos, sendo um otimizado para o vermelho e outro para o azul. As fibras óticas de uma metade do arranjo principal e de céu são alinhadas na entrada (fenda) do sistema otimizado para o vermelho e a outra metade dos dois arranjos é alinhada na entrada do sistema otimizado para o azul. O instrumento conta com a possibilidade de bloquear o caminho ótico “azul”. Desta forma, quando o espectrógrafo usa a metade “vermelha” do arranjo, a cobertura espacial é de $3,5'' \times 5''$ e $1,75'' \times 5''$ nos campos principal e de céu, respectivamente, e tem uma cobertura espectral máxima. Quando as duas metades são usadas simultaneamente, a cobertura espectral diminui pela metade para que os espectros extras caibam no detector, mas por outro lado, a cobertura dobra, sendo de $7'' \times 5''$ e $3,5'' \times 5''$ nos campos principal e de céu, respectivamente. Os espectros incidem em um conjunto de 3 detectores, separados por um pequeno espaço que corresponde a alguns Å no espectro, que é interpolado na redução.

2.3 Redução de dados

Para a redução dos dados, usamos uma série de tarefas do pacote GMOS, desenvolvido como parte do pacote GEMINI, ambos criados como ferramentas para a redução de dados dentro do programa IRAF.

A imagem de cada CCD deve ser, inicialmente, reduzida separadamente. Primeiro elimina-se a corrente de *bias*. Após, é necessário compensar as diferenças nas respostas dos píxeis do CCD dividindo-se a imagem por outra imagem de um campo uniformemente iluminado (*flat-field*). No GMOS operando em modo IFU, este processo é feito de forma um pouco diferente: primeiro determina-se o traçado dos espectros sobre o detector e faz-se a extração dos espectros. Com estes extraídos,

determina-se a variação pixel-a-pixel ao longo dos caminhos de extração dos espectros e aplica-se esta correção nos espectros dos objetos, também já extraídos. Após isto, foram feitas a subtração do céu, calibração em comprimento de onda e em fluxo. Por fim, foram construídos os cubos de dados que contém informações espaciais em duas dimensões e espectrais na terceira, com amostragem espacial de $0,1'' \times 0,1''$. Os cubos finais foram obtidos fazendo um mosaico dos cubos individuais para cada objeto.

2.4 Metodologia

Nesta seção, descrevemos detalhes da metodologia e análise de dados.

2.4.1 Medida das linhas de emissão

O número de espectros no cubo de dados resultante da redução é de 11770 por galáxia, o que inviabiliza a medição manual das linhas de emissão. A tarefa FITPROFS do IRAF foi, então, automatizada a fim de realizar estas medidas. Utilizamos esta tarefa para ajustar curvas gaussianas ao perfil das linhas de emissão, com o objetivo de obter mapas bidimensionais para as distribuições de fluxos e razões de linhas, campo de velocidades (obtido do comprimento de onda correspondente ao pico da gaussiana) e mapas para a dispersão de velocidades (σ , obtida da largura a meia altura da gaussiana, FWHM – *Full Width at Half Maximum*, sendo $\sigma = \text{FWHM}/2,355$). Obtivemos mapas de contínuo fazendo médias de regiões do espectro onde não há linhas de emissão e/ou absorção.

2.4.2 O modelo de rotação

Os mapas de velocidades para a região circumnuclear das galáxias estudadas neste trabalho são dominados por rotação e, por este motivo, adotamos um modelo analítico

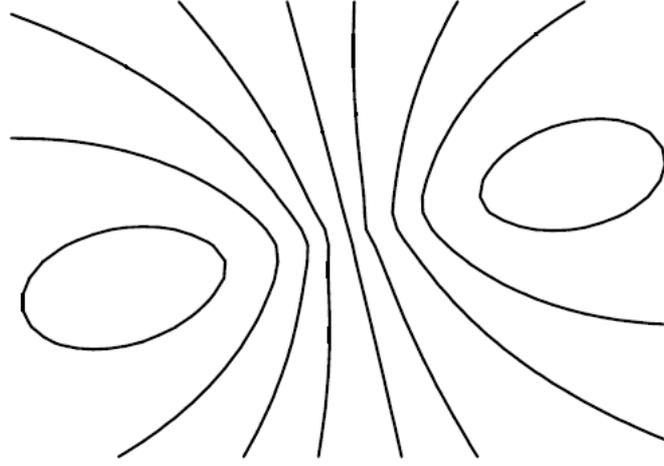


Figura 2.1: Curvas de isovelocidades produzidas pelo modelo de Plummer com valores arbitrários para os parâmetros.

simples para descrever o campo de velocidades, com o objetivo de obter parâmetros físicos como a velocidade sistêmica, orientação da linha dos nodos, massa do bojo e a posição do centro cinemático, bem como isolar componentes que diferem da rotação para a cinemática do gás. Neste modelo assumimos que o gás segue órbitas circulares planas em um potencial gravitacional de Plummer, dado por (Binney & Tremaine 1988):

$$P = -\frac{GM}{\sqrt{r^2 + a^2}}, \quad (2.1)$$

onde a é um comprimento de escala, r é a distância radial no plano da galáxia, M é a massa contida dentro do raio r , G é a constante gravitacional. X_0, Y_0 são as coordenadas do centro cinemático. A velocidade circular do gás sujeito a este potencial, no plano da galáxia, é dada por:

$$v_c^2 = r \frac{dP}{dr} = \frac{r^2 G M}{\sqrt{r^2 + a^2}}. \quad (2.2)$$

Assumindo que as órbitas estão contidas no plano (i, Ψ_0) , onde i é a inclinação do disco em relação ao plano do céu ($i = 0$ para a galáxia vista de frente e $i = 90^\circ$ para a galáxia vista de perfil) e Ψ_0 é o ângulo de posição da linha dos nodos, pode-se obter uma expressão para a velocidade no plano do céu. Esta velocidade radial, na posição (R, Ψ) , onde R é a distância radial ao núcleo projetada no plano do céu com o correspondente ângulo de posição Ψ [medido de N (0°) para E (90°)], é dada por (Barbosa et al. 2006):

$$V_r = V_s + \sqrt{\frac{R^2 GM}{(R^2 + A^2)^{3/2}}} \frac{\text{sen}(i) \cos(\Psi - \Psi_0)}{\left(\cos^2(\Psi - \Psi_0) + \frac{\text{sen}^2(\Psi - \Psi_0)}{\cos^2(i)}\right)^{3/4}} \quad (2.3)$$

onde V_s é a velocidade sistêmica e r e R e a e A estão relacionados por $r = \alpha R$ e $a = \alpha A$, onde:

$$\alpha = \sqrt{\cos^2(\Psi - \Psi_0) + \frac{\text{sen}^2(\Psi - \Psi_0)}{\cos^2(i)}}. \quad (2.4)$$

O modelo adotado gera curvas de isovelocidades que constituem o chamado “diagrama aranha”, que é ilustrado na Fig. 2.1. Os parâmetros livres da equação 2.3 foram determinados fazendo-se um ajuste ao campo de velocidades observado, utilizando um algoritmo de ajustes por mínimos quadrados não linear (Levenberg-Marquardt), no qual são dadas estimativas iniciais para os parâmetros livres. A inclinação do disco está acoplada a M , pois $V_r^2 \propto M \text{sen}(i)$ e, quando ambos os parâmetros forem mantidos livres, os valores fornecidos pelo ajuste apresentam esta degenerescência.

Capítulo 3

Resultados: A galáxia NGC 1566

Neste capítulo, apresentamos a cinemática do gás em torno do núcleo de NGC 1566 a partir das medidas das linhas de emissão do [N II] em 6585,27 Å e [S II] em 6718,29 e 6730,81 Å. A linha H α não pôde ser medida pois, na maior parte dos espectros, esta linha está distorcida por sua posição estar no gap entre os CCDs. Em parte dos espectros, a linha do [N II] λ 6585,27 Å também não pôde ser medida. Esta fração dos espectros corresponde à região preta a oeste do núcleo nos mapas de velocidade radial e dispersão de velocidades na Fig. 3.2. A distorção no perfil da linha H α pode ser vista no painel inferior (posição B) da Fig 3.1. Em NGC 1566 o campo resultante das observações foi de 7,0'' \times 15,0'', o que corresponde na galáxia a 693 \times 1485 pc². O eixo maior fotométrico da galáxia tem um ângulo de posição 44° (Agüero et al. 2004).

No painel superior esquerdo da Fig. 3.1, apresentamos uma imagem em grande escala de NGC 1566 na banda V (Kennicutt et al. 2003), a qual foi obtida com o telescópio de 1.5 m do Observatório Inter-Americano de Cerro Tololo (CTIO, *Cerro Tololo Inter-American Observatory*, no Chile). O quadrado central mostra o campo das observações da câmera WFPC2 do HST. No painel superior da direita, apresentamos a imagem da parte central da galáxia obtida com a WFPC2, a qual foi utilizada

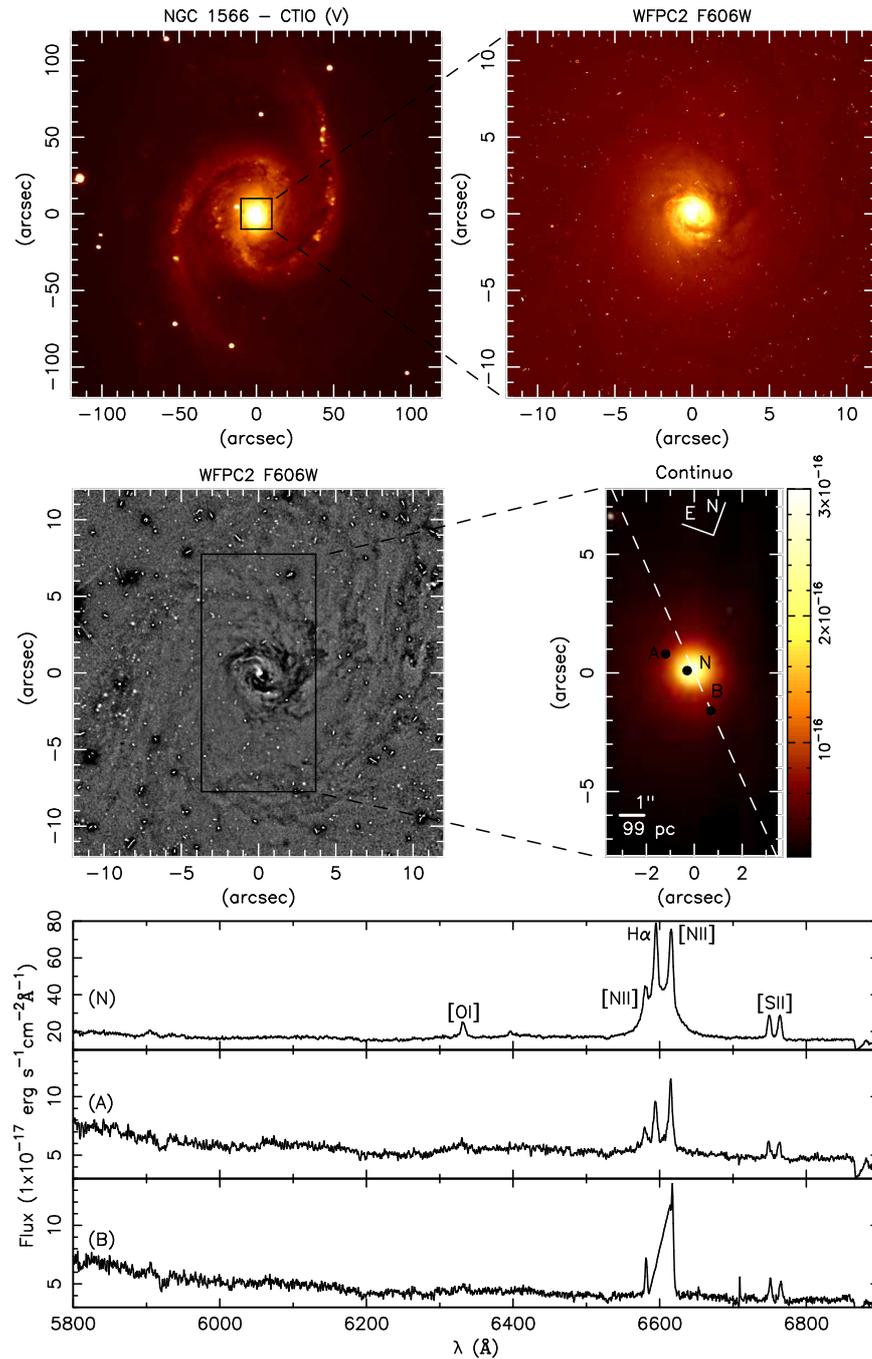


Figura 3.1: Acima: Esquerda - Imagem em grande escala na banda V de NGC 1566, onde o quadrado central indica o campo observado com a WFPC2; Direita - Imagem obtida com a WFPC2 usando o filtro F606W. Centro: Esquerda - mapa de estrutura, onde o retângulo central indica o campo das observações com a IFU; Direita - Mapa de contínuo obtido a partir de dados da IFU. Abaixo: Espectros para as posições N, A e B indicadas no mapa de contínuo.

para construir o mapa de estrutura da galáxia (Simões Lopes et al. 2007). Aplicamos uma rotação a ambas as imagens para que sua orientação coincida com a da IFU em nossas observações. No painel central esquerdo, apresentamos o mapa de estrutura obtido a partir da imagem do HST, onde o retângulo central mostra o campo das observações com o IFU-GMOS. No painel central direito, apresentamos o mapa de contínuo obtido fazendo-se uma média do fluxo no contínuo entre 5900 e 6100 Å dos espectros da IFU. As imagens e mapas mostrados estão centrados no núcleo, adotado como correspondendo ao pico do fluxo no contínuo.

Nos painéis inferiores, apresentamos três espectros característicos: um para a posição 0,3'' a leste do núcleo (posição N no mapa de contínuo), um para a posição 1,9'' a leste do núcleo (posição A) e outro para a posição 1,2'' a sudoeste do núcleo (posição B). Como mencionado acima, nesta galáxia a posição da linha H α no detector coincidiu, em vários espectros, com uma das divisões que existem entre os 3 CCDs da IFU do GMOS, como é o caso do espectro da posição B que, por isto, teve a linha H α “cortada”. O mesmo aconteceu com a linha [N II] λ 6585,27 Å, porém, para um número menor de espectros. Como o espectro da posição nuclear estava também afetado por este problema, optamos por usar o espectro da posição N como representativo do núcleo, considerando sua proximidade a este, e tendo em vista que a resolução espacial das nossas observações, ou a largura total a meia altura de uma imagem pontual – a PSF – é da ordem de 0,9''. As linhas de emissão estão identificadas no espectro da posição N.

3.1 A cinemática do gás

Apresentamos o campo de velocidades radiais e os mapas de dispersão de velocidades para o gás emissor na Fig. 3.2 para a linha [N II] λ 6585,27 Å e na Fig. 3.3 para a linha [S II] λ 6718,29 Å.

Nestes mapas de velocidade, subtraímos a velocidade sistêmica, obtida do ajuste do modelo de rotação à cinemática em cada linha, tanto dos mapas de velocidades radiais como dos mapas mostrando os modelos. Os pontos pretos nos mapas de velocidade radial e de dispersão de velocidades correspondem a locais onde não foi possível medir a linha devido a uma baixa razão sinal-ruído ou ao problema da linha ter “caído” no gap entre os CCDs, como discutido anteriormente.

Verifica-se a presença de um padrão de rotação nos mapas de velocidade radial das duas linhas, no qual o lado nordeste da galáxia se aproxima e o lado sudoeste se afasta. A partir da hipótese usual de que os braços espirais são “trailing”, ou seja, “seguem” a rotação da galáxia, conclui-se, então, que o lado próximo da galáxia é o lado noroeste e o lado distante é o sudeste (marcados NEAR e FAR, respectivamente, nas Figs. 3.2, 3.3 e 3.4).

O ajuste do modelo de rotação, descrito no capítulo 2, dá os seguintes parâmetros para o modelo ajustado à cinemática do gás, obtida a partir das linhas do [N II] λ 6585,27 Å e [S II] λ 6718,29 Å:

Tabela 3.1: Parâmetros resultantes do ajuste do modelo cinemático a NGC 1566.

	X_0 (pc)	Y_0 (pc)	M (M_{\odot})
[N II]	20,4 (\pm 1,0)	-57,7 (\pm 0,8)	$1,5 \times 10^9$ (\pm $2,21 \times 10^7$)
[S II]	20,1 (\pm 3,1)	-38,9 (\pm 2,4)	$1,5 \times 10^9$ (\pm $7,4 \times 10^7$)
	ψ_0 (graus)	V_s (km s^{-1})	A (pc)
[N II]	-103,1 (\pm 0,3)	1508,1 (\pm 0,3)	119,9 (\pm 1,5)
[S II]	-97,4 (\pm 0,6)	1492,6 (\pm 1,1)	121,0 (\pm 5,1)

Onde X_0 e Y_0 são as coordenadas do centro cinemático em relação ao pico do contínuo, ψ_0 é o ângulo de posição da linha dos nodos, V_s é a velocidade sistêmica e A está relacionada com o comprimento de escala por $A = \alpha \times a$, estando a função α definida no capítulo 2. Os erros nos ajustes estão listados na tabela, entre parênteses, e os erros nas medidas são da ordem de 5 km s^{-1} para o [N II] e 8 km s^{-1} para o [S II]. O ajuste dá um centro cinemático deslocado em relação ao pico do contínuo por cerca de 20 pc ao longo do eixo horizontal para oeste (direita nas figuras) e entre ≈ 40 e 60 pc ao longo do eixo vertical para sul (para baixo nas figuras), para as medidas nas duas linhas de emissão. Considerando que a resolução espacial é de cerca de $0,9''$, correspondendo a ≈ 90 pc na galáxia, o deslocamento do centro cinemático em relação ao pico do contínuo é significativo somente para o eixo vertical. Para a linha do [N II], a velocidade sistêmica resultou $\approx 15 \text{ km s}^{-1}$ maior do que para a linha do [S II], valor que é da ordem da incerteza das medidas de velocidade e, portanto, não é uma diferença significativa. A amplitude da curva de rotação é praticamente a mesma para as duas linhas. A inclinação foi mantida fixa em $i = 40,1^\circ$, valor obtido da razão entre os eixos maior e menor (valores obtidos na base de dados do NED), assumindo que o disco da galáxia é circular.

Comparando os mapas de velocidade radial com os dos modelos de rotação ajustados concluímos que, para as duas linhas de emissão, observa-se desvios de uma rotação simples. Calculamos os resíduos entre as velocidades observadas e modeladas a fim de tornar evidentes estes desvios e compará-los ao mapa de estrutura para investigar se estes desvios correspondem a estruturas da parte central da galáxia.

Observemos os mapas de velocidades e seus resíduos em relação aos modelos para as duas linhas de emissão: [N II] (Fig. 3.2) e [S II] (Fig. 3.3). No mapa de resíduos de [S II], observamos que parte dos desvios encontrados a nordeste do núcleo parecem estar relacionados a um braço espiral nuclear, assinalado nos mapas através

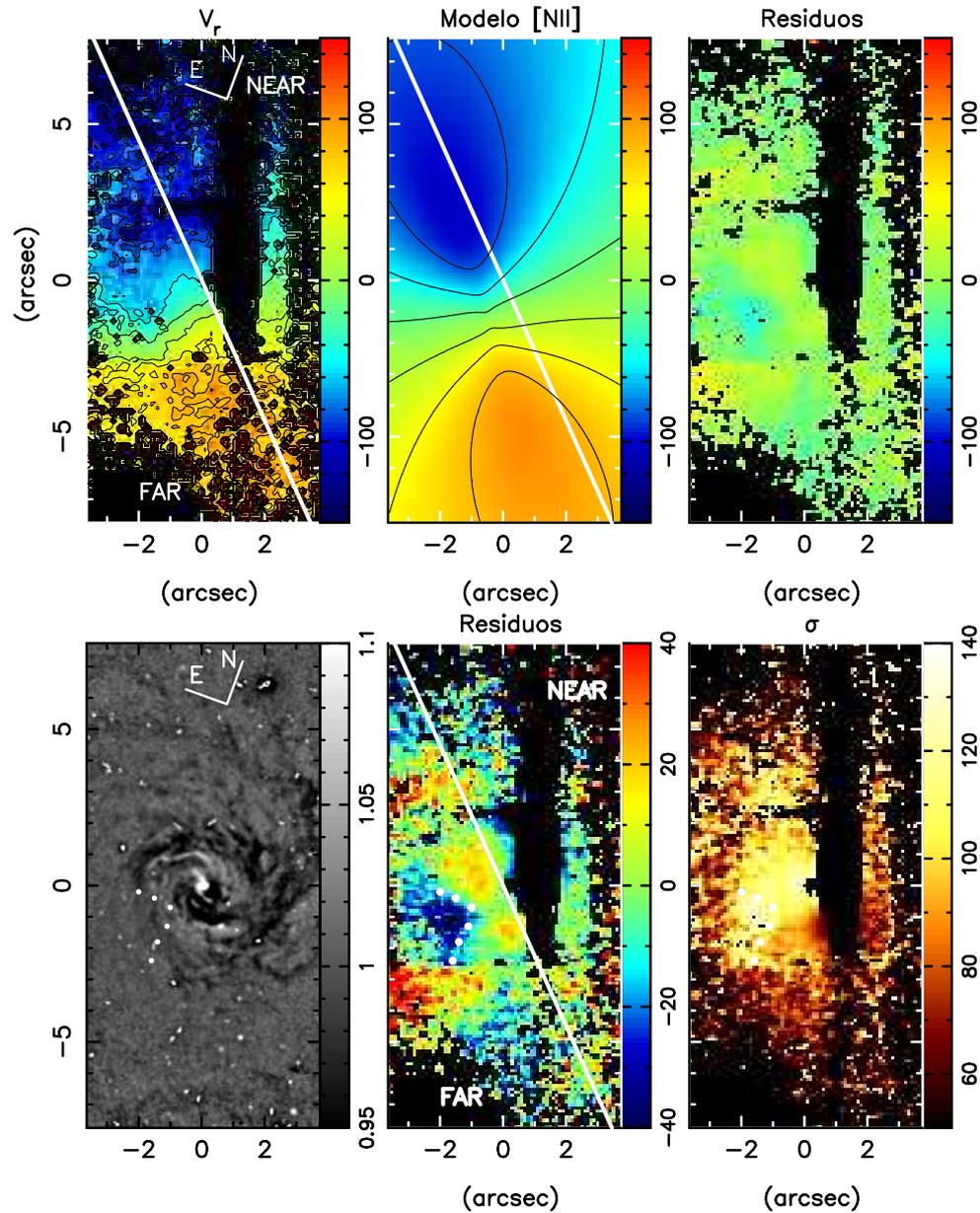


Figura 3.2: Os painéis da esquerda mostram, de cima para baixo, o campo de velocidades (km s^{-1}) para a linha $[\text{N II}] \lambda 6585,27 \text{ \AA}$ e o mapa de estrutura, respectivamente. Os painéis centrais mostram, de cima para baixo, o modelo ajustado a linha (km s^{-1}) e o mapa de resíduos, respectivamente. Os painéis da direita mostram, de cima para baixo, o mapa de resíduos com a mesma escala do campo de velocidades e o mapa de dispersão de velocidades para a linha (km s^{-1}), respectivamente. A linha branca representa o eixo maior da galáxia (Agüero et al. 2004). NEAR e FAR são, respectivamente, os lados próximo e distante da galáxia. Os pontos brancos delimitam uma região com velocidades negativas no mapa de resíduos.

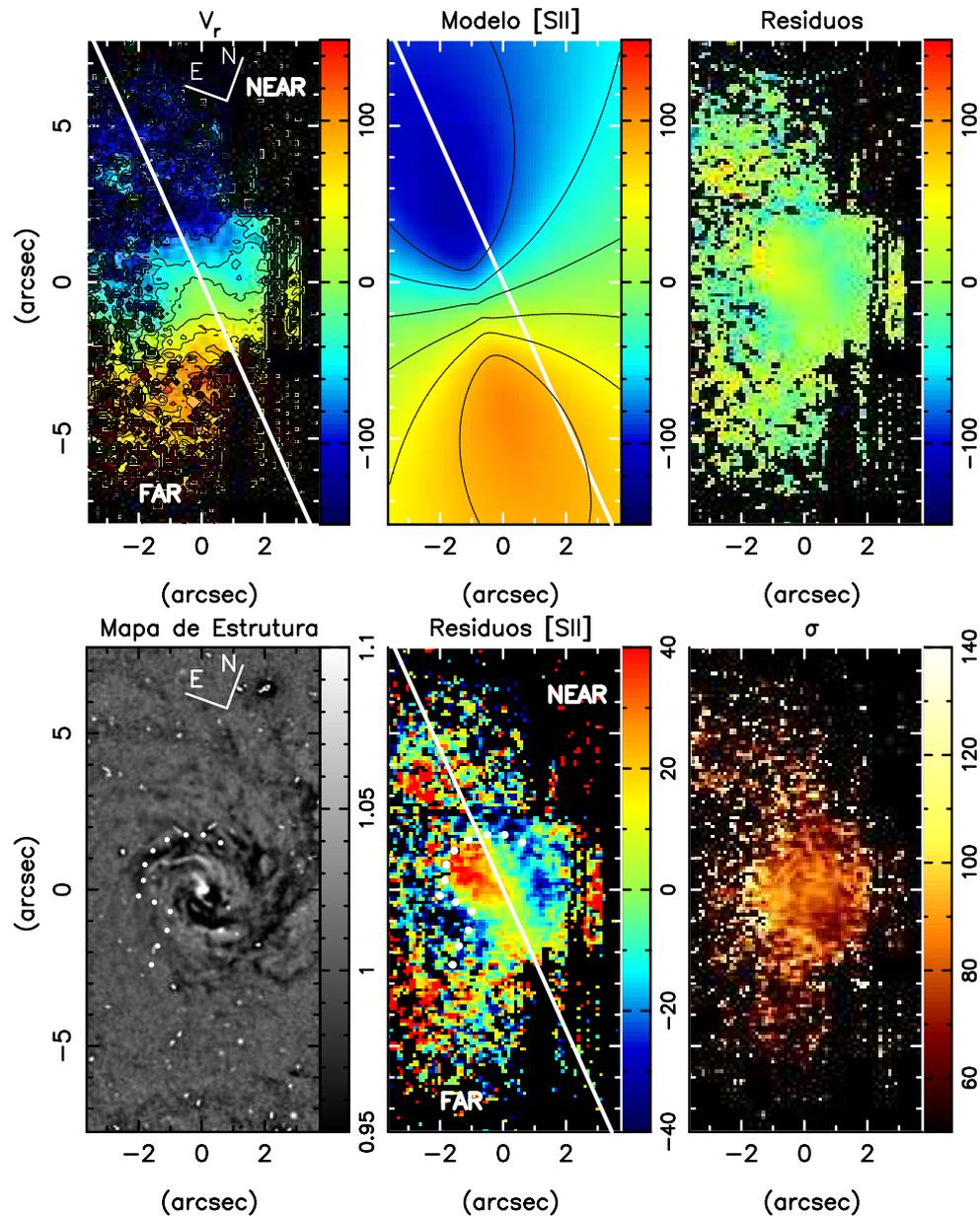


Figura 3.3: Os painéis da esquerda mostram o mapa de estrutura. Os painéis centrais mostram, de cima para baixo, o campo de velocidades (km s^{-1}) para a linha [SII] $\lambda 6718,29 \text{ \AA}$ e o modelo ajustado (km s^{-1}) a esta linha, respectivamente. Os painéis da direita mostram, de cima para baixo, o mapa de dispersão de velocidades para a linha (km s^{-1}) e o mapa de resíduos, respectivamente. A linha branca representa o eixo maior da galáxia (Agüero et al. 2004). NEAR e FAR são, respectivamente, os lados próximo e distante da galáxia. Os pontos brancos na parte superior dos painéis representam um braço espiral visto no mapa de estrutura. Os pontos brancos na parte inferior delimitam uma região com velocidades negativas no mapa de resíduos.

de uma seqüência de pontos brancos. Contornando esta seqüência de pontos brancos, observamos um excesso de velocidades negativas que podem ser interpretadas como devido a gás no plano com velocidade maior do que a velocidade de rotação, devido a um movimento adicional ao longo do braço espiral. Este excesso é observado como velocidade negativa nas proximidades da linha dos nodos se consideramos que o gás vem do lado distante da galáxia para o lado mais próximo. Como o braço espiral acaba no núcleo, podemos inferir que estamos vendo o gás “escorrer” ao longo do braço espiral em direção ao núcleo. Isto é menos claramente observado no mapa de resíduos de [N II], mas observando diretamente no campo de velocidades radiais, podemos ver que há uma descontinuidade nas velocidades negativas, que apresentam um excesso na região do braço espiral.

Há uma outra região, se estendendo do núcleo a cerca de $2,0''$ dele para leste, observada no mapa de resíduos de [S II], que atinge velocidades positivas em torno de 40 km s^{-1} .

Verificamos que a orientação desta estrutura é a mesma que a de uma região de emissão estendida em [O III], observada pelo Dr. Henrique Schmitt (Schmitt & Kinney 1996). O Dr. Henrique Schmitt gentilmente cedeu a imagem de banda estreita em [O III] onde aparece esta estrutura, a qual mostramos na Fig. 3.4. A extensão da emissão em [O III] é de apenas $0,7''$, mas coincide com a base da estrutura em *redshift* que observamos no mapa de resíduos, sugerindo que estamos observando um *outflow* a partir do núcleo, relacionado com a estrutura em [O III]. O *outflow* observado é mais estendido do que a estrutura observada na imagem de [O III], mas isto pode se dever a uma exposição insuficiente na observação de [O III]. Notamos que este *outflow*, que parece estar projetado sobre o lado distante da galáxia, pode estar escondendo um possível *inflow* no plano.

A sudeste do núcleo é visível no mapa de resíduos para ambas as linhas uma região com velocidades negativas em torno de 40 km s^{-1} , marcada com pontos brancos nas Figs. 3.2 e Fig 3.3. Estando a região no lado distante da galáxia, interpretamos este desvio para o azul como indicativo de um movimento de gás em direção ao núcleo, ou *inflow*. Não vemos velocidades negativas nas proximidades do núcleo, como seria esperado estando esta região em *inflow*, pois este estaria sendo ocultado pelo *outflow* anteriormente discutido, que se encontra nas proximidades.

Em grande escala, Agüero et al. (2004) observaram *inflows* próximos ao eixo menor, no lado distante da galáxia. Este *inflow* encontrado por nós pode estar relacionado ao encontrado por Agüero et al. (2004).

Quanto à dispersão de velocidades σ , notamos que, para [N II], σ cresce em direção ao centro, atingindo valores máximos de 120 km s^{-1} , que são parcialmente co-espaciais com o *outflow* observado para leste. Para [S II], os maiores valores da dispersão de velocidades também são parcialmente co-espaciais com o *outflow* observado para leste. Este aumento em σ indica um aumento na velocidade interna do gás, que poderia ser atribuída ao *outflow*. Já para nordeste, onde são observados os resíduos associados ao braço espiral assinalado no mapa de estrutura, observamos também um aumento no valor de σ na região adjacente ao braço, o que sugere que o gás também está mais perturbado neste local, o que pode, então, ser devido ao movimento de “escorrimento” (*streaming*, em inglês) do gás ao longo do braço espiral em relação ao movimento de rotação no plano da galáxia, o que introduz uma “turbulência” no gás ao seu redor.

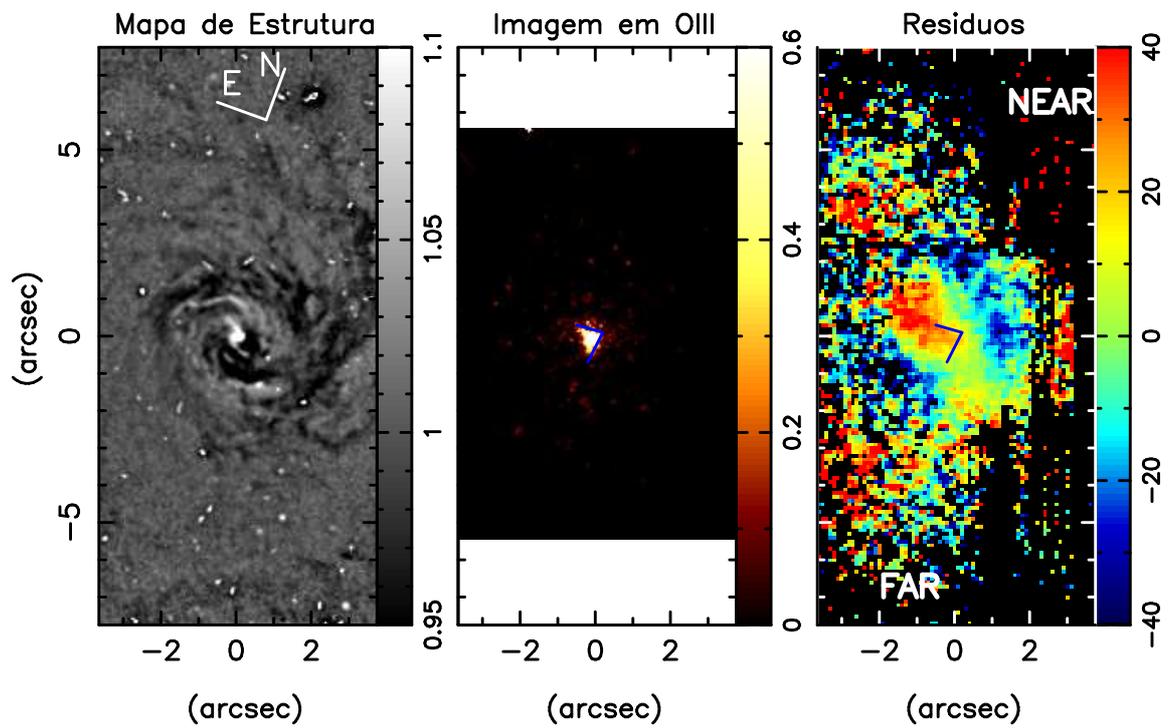


Figura 3.4: Esquerda: Mapa de estrutura; Centro: imagem em $[O III]$ (Schmitt & Kinney 1996); Direita: Mapa de resíduos para a linha $[S II] \lambda 6718,29 \text{ \AA}$. Interna ao cone azul está a região com maior emissão em $[O III]$.

3.2 Taxa de acreção de massa ao núcleo ativo

Podemos usar a velocidade residual observada ao longo da região com velocidades negativas a sudeste do núcleo para estimar o fluxo de matéria que chega até este. Para isso, calculamos o fluxo de matéria que cruza uma seção de choque circular. este fluxo é dado por:

$$\phi = N_e v \pi r^2 m_p f \quad (3.1)$$

Onde N_e é a densidade de elétrons, v é a velocidade de streaming do gás em direção ao núcleo, m_p é a massa do próton, r é o raio da seção de choque (que assumimos como sendo igual a 75 pc) e f é o filling factor (fator de preenchimento). O filling factor foi estimado de:

$$L_{H\alpha} \sim f N_e^2 j_{H\alpha}(T) V \quad (3.2)$$

Onde $L_{H\alpha}$ é a luminosidade em $H\alpha$ emitida por um volume V e $j_{H\alpha}(T) = 3.534 \times 10^{-25}$ erg cm⁻³ s⁻¹ (Osterbrock 1989). Na região com velocidades negativas, obtemos um fluxo médio por pixel de 10^{-16} ergs cm⁻² s⁻¹. Para calcular a luminosidade em $H\alpha$ nesta região, adotamos uma área de $2'' \times 2,5''$, que corresponde a 500 pixels. Nós, então, obtemos uma luminosidade $L_{H\alpha} = 5 \times 10^{-14}$ ergs cm⁻² s⁻¹ $\times 4\pi(20 \text{ Mpc})^2 = 2,39 \times 10^{39}$ ergs⁻¹. Adotando um volume aproximado para a região de $2'' \times 2,5'' \times 1''$, ou $V = 5000(9,9 \text{ pc})^3$, obtemos $f \approx 0,0047$.

A velocidade média na região em *inflow* é de 40 km s^{-1} . Corrigindo esta velocidade em relação a inclinação da galáxia ($i = 40,1^\circ$), temos que $v = 62 \text{ km s}^{-1}$. Para $N_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ e $v = 62 \text{ km s}^{-1}$, obtemos, para fluxo de matéria em direção ao núcleo, um valor de $\phi \approx 1,3 \times 10^{-2} M_\odot \text{ ano}^{-1}$.

É necessário frisar que o valor acima obtido é apenas uma estimativa, já que depende de parâmetros incertos como a geometria do fluxo. Assumindo que o gás nesta

região está atingindo o núcleo, podemos comparar esta taxa de matéria que chega ao núcleo ativo com a taxa de acreção necessária para produzir a sua luminosidade. Sendo a luminosidade da galáxia (Kilborn et al. 2005):

$$L = 1,4204 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1} \quad (3.3)$$

A taxa de acreção de massa pode então ser estimada como:

$$\dot{m} = \frac{L_{bol}}{c^2 \eta} \quad (3.4)$$

onde η é a eficiência da conversão da energia da massa de repouso do material acretado em radiação. Para um disco de acreção “padrão”, geometricamente fino e opticamente espesso, $\eta \approx 0,1$ (Frank et al. 2002). Usamos este valor para obter uma taxa de $\dot{m} = 2,5 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$.

A diferença entre os valores não é inesperada, já que observamos apenas o gás ionizado e gás neutro e molecular provavelmente também está se dirigindo ao núcleo. Além disso, como dito antes, o *outflow* encontrado pode estar escondendo um possível *inflow* no plano.

3.3 Estimativa da massa do buraco negro central

Podemos estimar a massa do buraco negro central usando a relação M- σ :

$$\log(M/M_{\odot}) = \alpha + \beta \log(\sigma/\sigma_0), \quad (3.5)$$

onde $\alpha = 8,13$, $\beta = 4,02$ e $\sigma_0 = 200 \text{ km s}^{-1}$, sendo α , β e σ_0 constantes (Tremaine et al. 2002) e σ a dispersão de velocidade das estrelas do bojo, que para NGC 1566 é igual

a 115 km s^{-1} (Bottema 1992). Usando estes valores, obtemos para a massa do buraco negro central:

$$M_{BH} = 1,46 \times 10^7 M_{\odot} \quad (3.6)$$

Capítulo 4

Resultados: A galáxia M81

Neste capítulo, apresentamos a cinemática do gás em torno do núcleo de M81 a partir das medidas das linhas de emissão do [N II] em 6585,27 Å e H α em 6564,614 Å. As linhas do [S II] em 6718,29 e 6730,81 Å não puderam ser medidas pois, na maior parte dos espectros, estas linhas estão distorcidas por suas posições estarem no gap entre os CCDs. O campo das observações para esta galáxia foi de 7,0'' \times 15,0'', o que corresponde a 119 \times 255 pc² na galáxia. O eixo maior fotométrico da galáxia está orientado ao longo do ângulo de posição 150° (Goad 1976).

No painel superior esquerdo da Fig. 4.1, apresentamos uma imagem em grande escala de M81 na banda *R* (Cheng et al. 1997), a qual foi obtida com o telescópio de 1.0 m do Observatório de Monte Laguna (MLO, *Mount Laguna Observatory*, nos EUA). O quadrado central mostra o campo das observações da câmera WFPC2 do HST. No painel superior da direita, apresentamos a imagem da parte central da galáxia obtida com a WFPC2 do HST, a mesma utilizada para construir o mapa de estrutura da galáxia (Simões Lopes et al. 2007). Aplicamos uma rotação a ambas as imagens para que sua orientação coincida com a da IFU em nossas observações. No painel central esquerdo, apresentamos o mapa de estrutura obtido a partir da

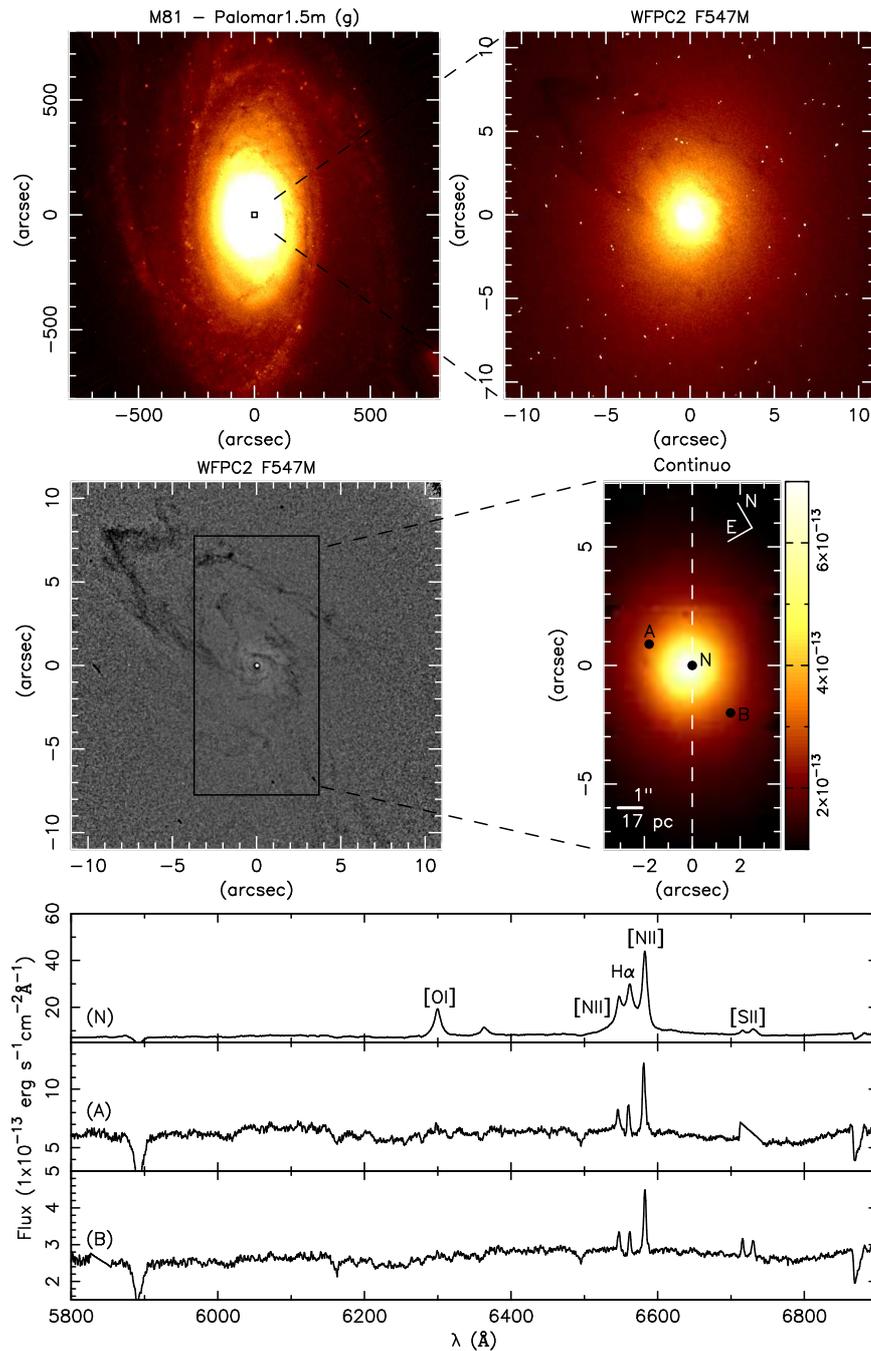


Figura 4.1: Acima: Esquerda - Imagem em grande escala na banda R de M81, onde o quadrado central indica o campo observado com a WFPC2; Direita - Imagem obtida com a WFPC2 usando o filtro F547M. Centro: Esquerda - mapa de estrutura, onde o retângulo central indica o campo das observações com a IFU; Direita - Mapa de contínuo obtido a partir de dados da IFU. Abaixo: Espectros para as posições N, A e B indicadas no mapa de contínuo. A linha tracejada no mapa de contínuo representa o eixo maior da galáxia.

imagem do HST, onde o retângulo central mostra o campo das observações com o IFU-GMOS. No painel central direito, apresentamos o mapa de contínuo obtido fazendo-se uma média do fluxo entre 5900 e 6100 Å dos espectros da IFU. As imagens e mapas mostrados estão centrados no núcleo, adotado como correspondendo ao pico do fluxo no contínuo. Nos painéis inferiores, apresentamos três espectros característicos: um para a posição correspondente ao núcleo (posição N no mapa de contínuo), um para a posição 2,3'' a nordeste do núcleo (posição A) e outro para a posição 2,9'' a sul do núcleo (posição B). Como dito anteriormente, a posição das linhas [S II] em 6718,29 e 6730,81 Å no detector, para esta galáxia, coincidiu em vários espectros com uma das divisões que existem entre os 3 CCDs da IFU do GMOS, como é o caso do espectro da posição A que, por isto, teve estas linhas “cortadas”. As linhas de emissão estão identificadas no espectro da posição N.

4.1 A cinemática do gás

Apresentamos, na Fig. 4.2, o mapa de estrutura, campo de velocidades e mapa de dispersão de velocidades para o gás emissor para as linhas [N II] λ 6585,27 Å (painel de baixo) e H α (painel de cima).

A velocidade sistêmica, que foi definida como sendo a média dos valores médios da velocidade das linhas [N II] λ 6585,27 Å e H α no campo observado, foi subtraída do campo de velocidade. Os pontos pretos nos mapas de velocidade radial e de dispersão de velocidades correspondem a locais onde não foi possível medir a linha devido a uma baixa razão sinal-ruído.

O campo de velocidades apresenta características de rotação, entretanto, a linha correspondente a velocidade zero, ao invés de ser perpendicular ao eixo maior da

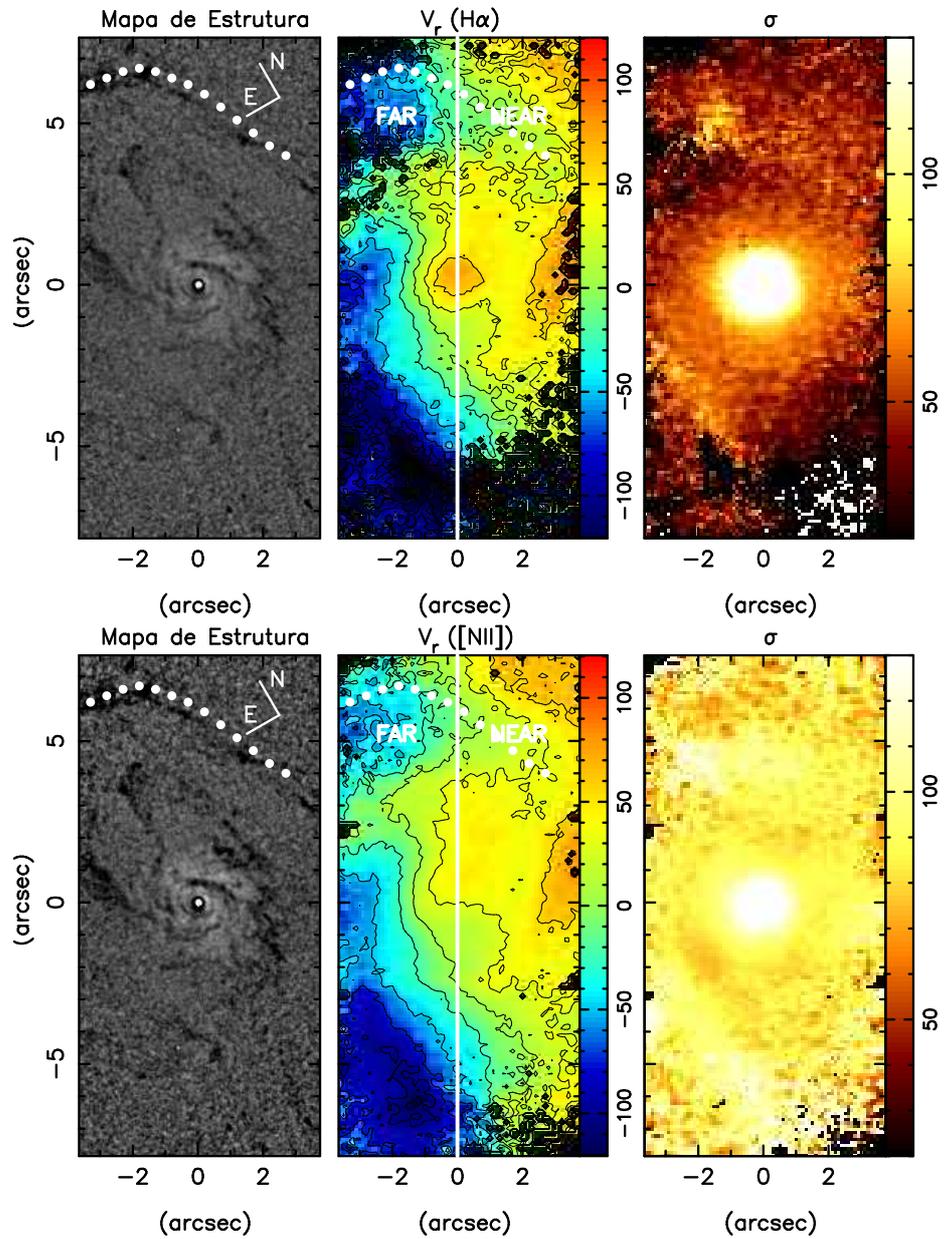


Figura 4.2: Os painéis da esquerda mostram o mapa de estrutura para a galáxia. Os painéis centrais mostram o campo de velocidades (km s^{-1}) para as linhas H α (acima) e [NII] (abaixo). Os painéis da direita mostram a dispersão de velocidades (km s^{-1}) linhas H α (acima) e [NII] (abaixo). NEAR e FAR representam os lados próximo e distante da galáxia, respectivamente. A linha vertical representa o eixo maior da galáxia e os pontos brancos sinalizam filamentos de poeira no mapa de estrutura.

galáxia, como esperado se este eixo maior coincide com o eixo maior cinemático, é distorcida e mais paralela do que perpendicular ao eixo maior. Inclusive, observando-se os padrões de rotação no campo, poder-se-ia dizer que há dois movimentos de rotação em torno de centros distintos. Por isto não foi possível ajustar um modelo cinemático ao campo de velocidades do gás. Além disto, a determinação dos lados próximo e distante da galáxia também não foi possível utilizando os campos de velocidade observados. Foi, então, necessária a consulta a um mapa de rotação em grande escala (Rots 1975), onde verifica-se a presença de um padrão de rotação, no qual o lado sudeste da galáxia se aproxima e o lado noroeste se afasta. A partir da hipótese usual de que os braços espirais “seguem” a rotação da galáxia, conclui-se que o lado próximo da galáxia é o lado sudoeste e o lado distante é o lado nordeste (marcados NEAR and FAR, respectivamente, na Fig. 4.2). Nota-se, também, que a velocidade do gás na vizinhança do núcleo apresenta um desvio para o vermelho de $\approx 70 \text{ km s}^{-1}$ para $\text{H}\alpha$ e $\approx 30 \text{ km s}^{-1}$ para $[\text{N II}]$, sugerindo um *inflow* de gás.

Observando os mapas de dispersão de velocidade para ambas as linhas, mostrados na Fig. 4.2, nota-se uma diferença nos valores, que são menores para a linha $\text{H}\alpha$. Isto pode ser explicado pela presença de absorção em $\text{H}\alpha$ na atmosfera das estrelas.

Observamos que as distorções nas linhas de isovelocidade na parte superior dos campos de velocidades mostrados na Fig. 4.2 estão relacionadas ao filamento de poeira visto na parte superior do mapa de estrutura. O filamento está marcado com pontos brancos na Fig 4.2.

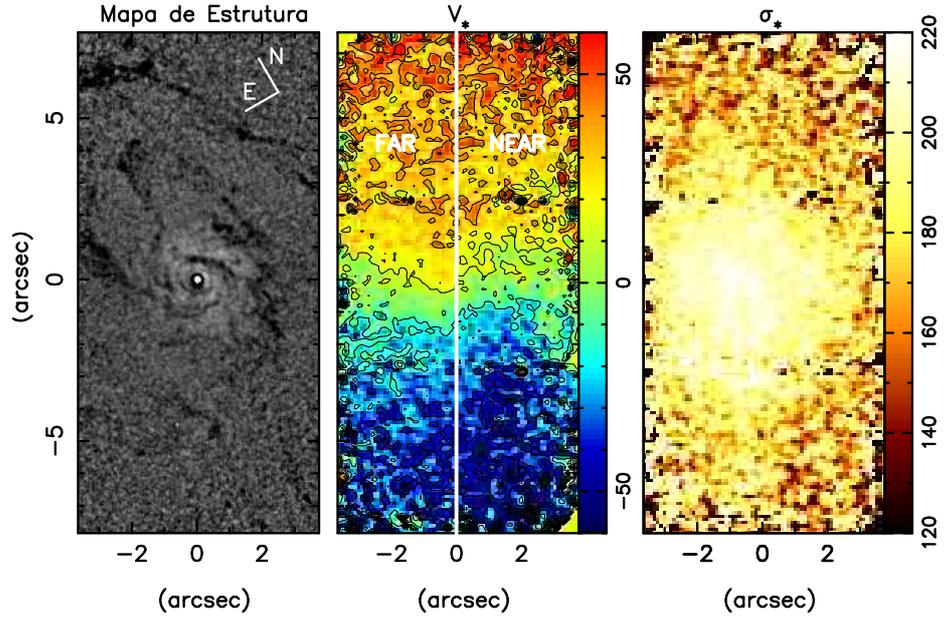


Figura 4.3: O painel da esquerda mostra o mapa de estrutura. O painel central mostra o campo de velocidades estelar (km s^{-1}). Os painel da direita mostra a dispersão de velocidades estelar (km s^{-1}). A linha vertical representa o eixo maior da galáxia.

4.2 A cinemática estelar

Como foi não possível ajustar o modelo cinemático a esta galáxia, e dado a alta razão sinal-ruído no contínuo estelar da galáxia, utilizamos a técnica pPXF (*penalized Pixel-Fitting*) de Cappellari & Emsellem (2004) para obter a cinemática estelar a partir das linhas de absorção entre 5600\AA e 6200\AA . Esta técnica adota um modelo para o espectro da galáxia $G_{\text{mod}}(x)$, obtido a partir da convolução do espectro de um template estelar $T(x)$ com a distribuição de velocidades ao longo da linha de visada (LSVD - *Line-of-Sight Velocity Distribution*), e reamostra os espectro dos templates e da galáxia para uma escala linear $x = \ln\lambda$, onde λ é o comprimento de onda. Os parâmetros que melhor ajustam a LSVD são determinados minimizando o χ^2 , que mede a concordância entre o modelo e o espectro observado da galáxia, $G(x)$, para o

conjunto de N pixels:

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N r_n^2, \quad (4.1)$$

Os resíduos são definidos como

$$r_n = \frac{G_{\text{mod}}(x_n) - G(x_n)}{\Delta G(x_n)}, \quad (4.2)$$

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

O modelo adotado para o espectro da galáxia pode ser escrito como:

$$G_{\text{mod}}(x) = \sum_{k=1}^K w_k [B * T_k](x) + \sum_{l=0}^L b_l P_l(x) \quad w_k \geq 0, \quad (4.3)$$

onde T_k é o template k da biblioteca de templates estelares, $B(x) = L(cx)$ é a função de alargamento, $L(v)$ é a LSVD, $v = cx$, c é a velocidade da luz e $*$ significa convolução. As funções $P_l(x)$ são polinômios de Legendre de ordem l e reproduzem diferenças em baixas frequências entre os espectros da galáxia e dos templates. Dada a $L(v)$, o melhor ajuste é obtido minimizando os resíduos entre o espectro observado e o modelo através de ajustes por mínimos quadrados não lineares dos pesos $(w_1, \dots, w_k, b_0, \dots, b_L)$.

A LSVD é escrita em termos das séries de Gauss-Hermite como:

$$L(v) = \frac{e^{-(1/2)y^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right], \quad (4.4)$$

onde H_m são os polinômios de Hermite, $y = (v - V)/\sigma$, $v = cx$, V é a velocidade radial, σ é a dispersão de velocidades e h_3, \dots, h_M são momentos de Gauss-Hermite de maiores ordens, que medem os desvios da LSVD em relação a uma distribuição de velocidades gaussianas. O parâmetro h_3 mede desvios assimétricos (como por exemplo asas dos perfis das linhas), enquanto que h_4 mede desvios simétricos (o achatamento)

da LSVD em relação a um perfil gaussiano (van der Marel & Franx 1993). Com estas definições, a minimização do χ^2 na equação 4.1 pode ser obtida a partir de ajustes por mínimos quadrados não lineares dos parâmetros $(V, \sigma, h_3, \dots, h_M)$. Por fim, o programa fornece como parâmetros de saída o campo de velocidades, σ , h_3 e h_4 .

O campo de velocidades estelar resultante se mostrou “bem comportado”, com um padrão de rotação que está de acordo com o campo de velocidades em grande escala (Rots 1975), com o lado sudeste se aproximando e o lado nordeste se afastando. A Fig. 4.3 mostra o campo de velocidades estelar, onde subtraímos a velocidade média no campo observado, adotada como velocidade sistêmica, bem como a dispersão de velocidades.

Quanto a dispersão de velocidades estelar, comparamos o valor médio por nós obtido, de $180 \pm 30 \text{ km s}^{-1}$, com valores prévios da literatura, que são da ordem de 170 km s^{-1} para a dispersão de velocidades das estrelas do bojo (Vega Beltrán et al. 2001, Nelson & Whittle 1995), e verificamos que nosso valor está de acordo com resultados prévios.

4.3 Comparação entre a cinemática do gás e das estrelas.

Construímos um mapa de resíduos a partir da subtração do campo de velocidades estelar do campo de velocidades do gás, a fim de isolar os movimentos não circulares do gás. Apresentamos na Fig. 4.4 os campos de velocidades das estrelas e do gás emissor (para as linhas $\text{H}\alpha$ e $[\text{N II}]$), o mapa de estrutura e os mapas de resíduos para ambas as linhas.

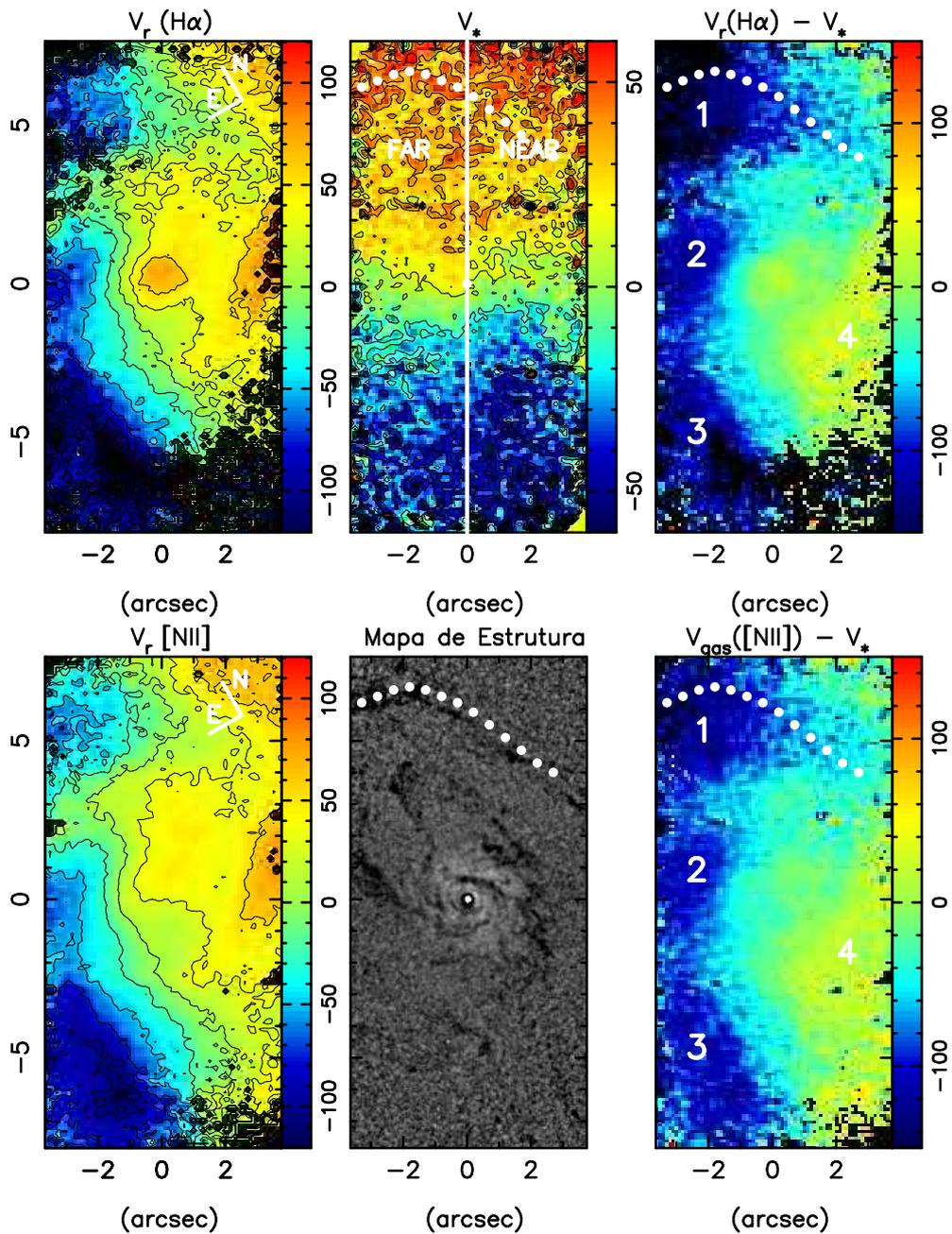


Figura 4.4: Os painéis da esquerda mostram o campo de velocidades (km s^{-1}) para as linhas H α (acima) e [N II] (abaixo). Os painéis centrais mostram o campo de velocidades estelar (km s^{-1}) (acima) e o mapa de estrutura (abaixo). Os painéis da direita mostram o mapa de resíduos (km s^{-1}) construído subtraindo o campo de velocidades estelar do gás do campo de velocidades da linha H α (acima) e [N II] (abaixo). NEAR e FAR representam os lados próximo e distante da galáxia, respectivamente. A linha vertical representa o eixo maior da galáxia, os pontos brancos sinalizam filamentos de poeira vistos no mapa de estrutura e os números regiões onde são observados *inflows*.

Observando os mapas de resíduos, vemos que o gás no lado distante da galáxia está *blueshifted*, sendo visíveis três regiões onde os resíduos são mais negativos, correspondentes aos números 1, 2 e 3 na Fig. 4.4. A presença de resíduos negativos sugere que nestas regiões o gás está em *inflow*. A noroeste, vemos alguns resíduos em *blueshift* que estão relacionados a um filamento de poeira, assinalado por pontos brancos no mapa de estrutura na Fig. 4.4. No lado próximo da galáxia observamos uma região, marcada como 4 na Fig. 4.4, com um pequeno desvio para o vermelho, o que também indica um movimento de gás em direção ao centro.

4.4 Taxa de acreção de massa ao núcleo ativo

Assumindo que as três regiões em *inflow* no lado distante da galáxia possuem a mesma geometria, o fluxo total de matéria que flui em direção ao núcleo ao longo destas regiões seria três vezes o fluxo de matéria ao longo de uma região. Sendo o fluxo de matéria ao longo de uma região dado por:

$$\phi = N_e v \pi r^2 m_p f \quad (4.5)$$

Onde N_e é a densidade de elétrons, v é a velocidade de streaming do gás em direção ao núcleo, m_p é a massa do próton, r é o raio da seção de choque (estimado como sendo de 17 pc) e f é o filling factor (fator de preenchimento, assumido como sendo $f = 0,001$).

Assumindo que a velocidade média nas três regiões é de 85 km s^{-1} , temos que a velocidade corrigida em relação a inclinação da galáxia ($i = 58,4^\circ$) é de $v \approx 100 \text{ km s}^{-1}$. Então, para $N_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ e $v = 100 \text{ km s}^{-1}$, obtemos, para fluxo de matéria em direção ao núcleo ao longo das três regiões, um valor de $\phi \approx 6,9 \times 10^{-4} M_\odot \text{ ano}^{-1}$.

Podemos, também, calcular o fluxo de matéria em direção ao núcleo ao longo da região 4. Sendo as velocidades residuais corrigidas para a inclinação em torno de $v \approx 50 \text{ km s}^{-1}$ nesta região, e o raio da seção de choque e filling factor adotados como 34 pc e $f = 0,001$, respectivamente, obtemos um fluxo de $\phi \approx 4,6 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. O fluxo de matéria total em direção ao núcleo é, então, de $\phi \approx 1,15 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Podemos, agora, comparar a taxa de gás que flui em direção ao núcleo com a taxa de acreção necessária para produzir a sua luminosidade.

Para estimar a taxa de acreção de massa, usamos a expressão:

$$\dot{m} = \frac{L_{bol}}{c^2 \eta} \quad (4.6)$$

onde η é a eficiência da conversão da energia da massa de repouso do material acretado em radiação. No caso de LINERs, o disco de acreção é geometricamente espesso e opticamente fino (Nemmen et al. 2006, Yuan 2007). Este tipo de acreção é conhecido como RIAF (*Radiatively Inefficient Accretion Flow* (Narayan 2005)), e possui um valor típico para $\eta \approx 0,01$. Usando este valor para η e uma luminosidade em raios X de $L = 1,58 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$, sendo a luminosidade bolométrica $L_B \approx 10L_X$, obtemos uma taxa de acreção de $\dot{m} = 2,79 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$.

Comparando a taxa de acreção a nossa estimativa da quantidade de matéria que flui em direção ao núcleo, vemos que a quantidade é suficiente para produzir a luminosidade do núcleo.

4.5 Estimativa da massa do buraco negro central

A massa do buraco negro central pode ser estimada usando a relação M- σ :

$$\log(M/M_{\odot}) = \alpha + \beta \log(\sigma/\sigma_0), \quad (4.7)$$

onde $\alpha = 8,13$, $\beta = 4,02$ e $\sigma_0 = 200 \text{ km s}^{-1}$, sendo σ a dispersão de velocidade das estrelas do bojo (Tremaine et al. 2002). Usando o valor de σ obtido por nós, obtemos para a massa do buraco negro central:

$$M_{BH} = 9_{-4}^{+6} \times 10^7 M_{\odot} \quad (4.8)$$

Esta estimativa da massa do buraco negro central concorda com o valor obtido por Devereux et al. (2003), que obtiveram um valor de $7,0_{-1}^{+2} \times 10^7 M_{\odot}$.

Capítulo 5

Resultados: A galáxia NGC 3982

Neste capítulo, apresentamos a cinemática do gás em torno do núcleo da galáxia NGC 3982 a partir das medidas das linhas de emissão do [N II] em $6585,27 \text{ \AA}$ e $H\alpha$ em $6564,614 \text{ \AA}$. As linhas do [S II] em $6718,29$ e $6730,81 \text{ \AA}$, a exemplo da galáxia M 81, não puderam ser medidas, pois na maior parte dos espectros os perfis destas linhas estão distorcidos por sua posição estar no gap entre os CCDs. O campo das observações para esta galáxia foi de $7,0'' \times 15,0''$, o que corresponde a $595 \times 1275 \text{ pc}^2$ na galáxia. O eixo maior fotométrico da galáxia localiza-se ao longo do ângulo de posição $28,8^\circ$ (valor obtido na base de dados do hyperleda¹ (Paturel et al. 2003)), medido de norte a leste.

No painel esquerdo da Fig. 5.1, apresentamos uma imagem de NGC 3982 obtida com a WFPC2 do HST (Malkan et al. 1998), que também foi utilizada para construir o mapa de estrutura desta galáxia (Simões Lopes et al. 2007). O retângulo central mostra o campo das observações com o IFU-GMOS. Aplicamos uma rotação a esta imagem a fim de que sua orientação coincida com a da IFU em nossas observações. No painel direito, apresentamos o mapa de contínuo obtido fazendo-se uma média do

¹disponível em <http://leda.univ-lyon1.fr/>

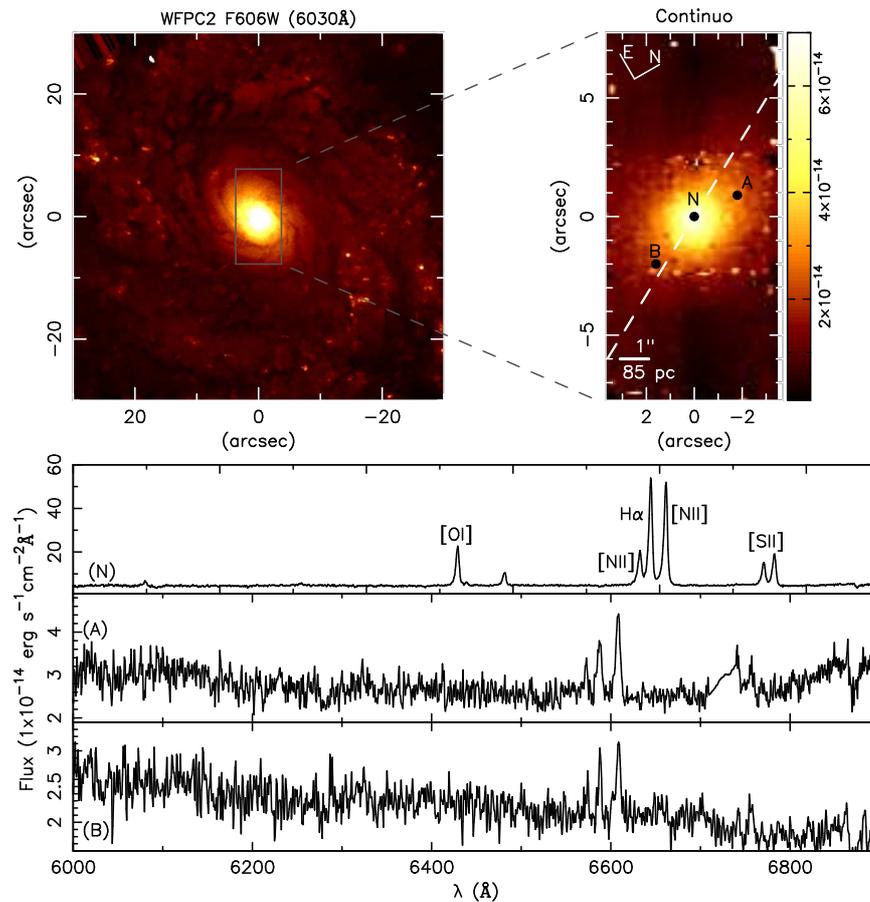


Figura 5.1: Acima: Esquerda - Imagem obtida com a WFC2 usando o filtro F606W, onde o retângulo central indica o campo das observações com a IFU. Direita - Mapa de contínuo obtido a partir de dados da IFU. Abaixo: Espectros obtidos para as posições N, A e B, indicadas no mapa de contínuo. A linha tracejada no mapa de contínuo representa o eixo maior da galáxia.

fluxo entre 5900 e 6100 Å dos espectros da IFU. As imagens e mapas mostrados estão centrados no núcleo, adotado como correspondendo ao pico do fluxo no contínuo. Nos painéis inferiores, apresentamos três espectros característicos: um para a posição correspondente ao núcleo (posição N no mapa de contínuo), um para a posição 2'' a norte do núcleo (posição A) e outro para a posição 2,5'' a sudoeste do núcleo (posição B). No espectro da posição A, podemos ver as linhas [S II] em 6718,29 e 6730,81 Å “cortadas”, devido a sua posição estar em um dos gaps dos CCDs da IFU do GMOS. As linhas de emissão estão identificadas no espectro da posição N.

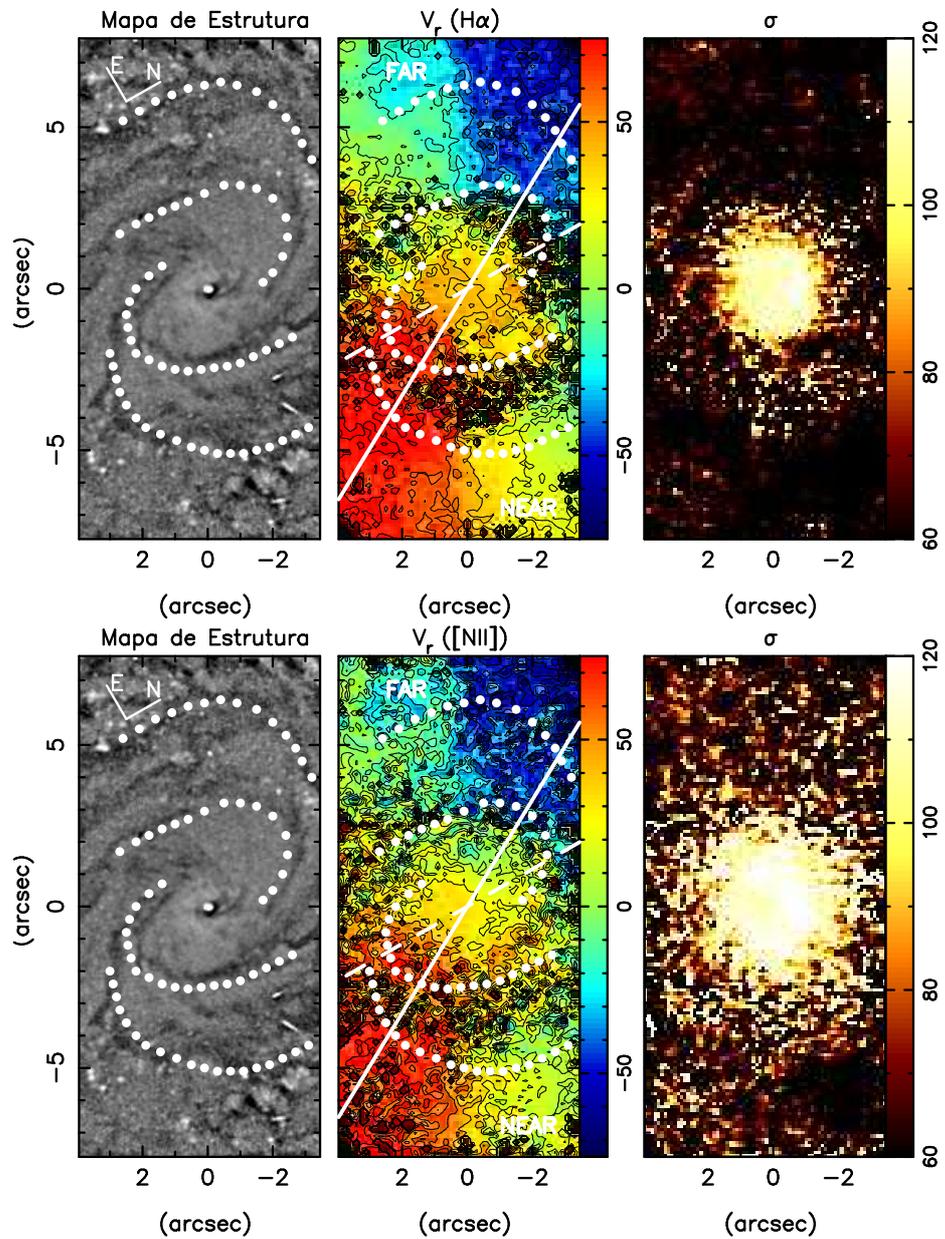


Figura 5.2: Os painéis da esquerda mostram o mapa de estrutura para a galáxia. Os painéis centrais mostram o campo de velocidades (km s^{-1}) para as linhas H α (acima) e [NII] (abaixo). Os painéis da direita mostram a dispersão de velocidades (km s^{-1}) nas linhas H α (acima) e [NII] (abaixo). NEAR e FAR representam os lados próximo e distante da galáxia, respectivamente. A linha sólida representa o eixo maior da galáxia, a linha tracejada representa a barra da galáxia e os pontos brancos sinalizam filamentos de poeira vistos no mapa de estrutura.

5.1 A cinemática do gás

Apresentamos o campo de velocidades radiais e os mapas de estrutura e dispersão de velocidades para o gás emissor na Fig. 5.2, para as linhas $[\text{N II}] \lambda 6585,27 \text{ \AA}$ e $\text{H}\alpha$. O ajuste do modelo cinemático (descrito no capítulo 2) a esta galáxia não foi bem sucedido.

A velocidade sistêmica foi subtraída dos campos de velocidades de ambas as linhas. Esta velocidade foi definida como sendo a média dos valores médios da velocidade das linhas $[\text{N II}] \lambda 6585,27 \text{ \AA}$ e $\text{H}\alpha$ no campo observado. Os pontos pretos nos mapas de velocidade radial e de dispersão de velocidades correspondem a locais onde não foi possível medir a linha devido a uma baixa razão sinal-ruído.

Observa-se a presença de um padrão de rotação no campo de velocidades, no qual o lado norte da galáxia se aproxima e o lado sul se afasta. A partir da hipótese usual de que os braços espirais “seguem” a rotação da galáxia, conclui-se que o lado próximo da galáxia é o lado oeste e o lado distante é o lado leste (marcados NEAR e FAR, respectivamente, na Fig. 5.2).

O mapa de estrutura desta galáxia mostra alguns filamentos de poeira em forma espiral, que estão marcados com pontos brancos na Fig. 5.2.

Observamos que há regiões onde não foi possível medir a linha associadas aos dois braços mais internos. Isto pode ser explicado pelo acúmulo de poeira nestas regiões. Distorções no campo de velocidades são vistas nas partes superior e inferior da figura, relacionadas aos braços mais externos. A leste é visível, mais claramente no campo de velocidades construído a partir da linha $\text{H}\alpha$, uma região com velocidades mais negativas que a sua vizinhança, no lado distante da galáxia, relacionada a um dos braços espirais. Co-espacialmente a esta região, observamos, também, um pequeno aumento na dispersão de velocidades. Este desvio para o azul pode ser interpretado

como um fluxo de gás em direção ao núcleo ao longo do braço espiral, causando uma turbulência em seu entorno, o que explicaria o aumento de σ .

Comparando os mapas de dispersão de velocidades das linhas $H\alpha$ e $[N II]$, notamos que σ para $[N II]$ atinge valores maiores. Isto já era esperado, pois o $[N II]$ é mais suscetível a choques do que o $H\alpha$. Além disso, $H\alpha$ pode estar afetado pela absorção estelar, diminuindo a FWHM medida.

5.2 Estimativa da massa do buraco negro central e da taxa de acreção

Utilizando a relação M - σ (Tremaine et al. 2002) e uma dispersão de velocidade das estrelas do bojo de $66,9 \text{ km s}^{-1}$ (valor obtido na base de dados do hyperleda), obtemos para a massa do buraco negro central:

$$M_{BH} = 1,65 \times 10^6 M_{\odot} \quad (5.1)$$

Para estimar a taxa de acreção de massa, usamos:

$$\dot{m} = \frac{L_{bol}}{c^2 \eta} \quad (5.2)$$

onde η é a eficiência da conversão da energia da massa de repouso do material acretado em radiação que, para uma galáxia Seyfert 2, é $\eta \approx 0,1$. O fluxo em raio-x para esta galáxia é igual a $f_X = 1,528 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (Halderson et al. 2001) sendo a luminosidade então $L \approx 10L_X = 5,66 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$. Então a taxa de acreção de massa para esta galáxia é de $\dot{m} = 9,98 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$.

Capítulo 6

Resultados: A galáxia NGC 4450

Neste capítulo, apresentamos a cinemática do gás em torno do núcleo da galáxia NGC 4450, a partir das medidas da linha de emissão do [N II] em $6585,27 \text{ \AA}$. A linha $H\alpha$ não foi medida para esta galáxia devido a sua baixa intensidade, o que a coloca dentro do perfil de absorção das estrelas em boa parte dos espectros. As linhas do [S II] em $6718,29$ e $6730,81 \text{ \AA}$ não foram medidas para esta galáxia devido a uma baixa razão sinal-ruído para estas linhas em grande parte dos espectros. O campo observado para esta galáxia foi de $21,0'' \times 5,0''$, produzindo uma cobertura muito maior em uma direção do que em outra, devido a um erro no posicionamento do telescópio. Este campo corresponde a $1722 \times 410 \text{ pc}^2$ na galáxia. O eixo maior fotométrico está orientado ao longo do ângulo de posição $172,3^\circ$ (valor obtido na base de dados do hyperleda).

No painel superior esquerdo da Fig. 6.1, apresentamos uma imagem em larga escala de NGC 4450 em $H\alpha$ (Kennicutt et al. 2003), obtida com o telescópio de 1,2 m do Kitt Peak National Observatory (EUA). No painel superior direito, apresentamos uma imagem da galáxia obtida com a WFPC2 do HST, imagem que também foi utilizada para a construção do mapa de estrutura. O quadrado central na imagem

em grande escala representa o campo de observação da WFPC2. Uma rotação foi aplicada a estas imagens para que apresentassem a mesma orientação da IFU em nossas observações. No painel inferior esquerdo, mostramos o mapa de estrutura da galáxia. O retângulo central mostra o campo das observações com a IFU do GMOS. No painel direito, apresentamos o mapa de contínuo, obtido fazendo-se uma média do fluxo entre 5900 e 6100 Å dos espectros da IFU. As imagens e mapas mostrados estão centrados no núcleo, adotado como correspondendo ao pico do fluxo no contínuo.

Nos painéis inferiores apresentamos três espectros característicos: um para a posição correspondente ao núcleo (posição N no mapa de contínuo), um para a posição 2,9'' a noroeste do núcleo (posição A) e outro para a posição 3,71'' a sudeste do núcleo (posição B). As linhas de emissão estão identificadas no espectro da posição N.

6.1 A cinemática do gás

Apresentamos o campo de velocidades radiais e os mapas de estrutura e dispersão de velocidades para o gás emissor na Fig. 6.2 para a linha [N II] λ 6585,27 Å. A velocidade sistêmica, definida como a velocidade média para o campo observado, foi subtraída do campo de velocidade. O ajuste do modelo cinemático descrito no capítulo 2 não foi bem sucedido neste caso. Os pontos pretos nos mapas de velocidade radial e de dispersão de velocidades correspondem a locais onde não foi possível medir a linha devido a uma baixa razão sinal-ruído.

Observa-se a presença de um padrão de rotação no campo de velocidades, no qual o lado sul da galáxia se aproxima e o lado norte se afasta. A partir da hipótese usual de que os braços espirais “seguem” a rotação da galáxia, conclui-se que o lado próximo da galáxia é o lado leste e o lado distante é o lado oeste (marcados NEAR e FAR, respectivamente, na Fig. 6.2).

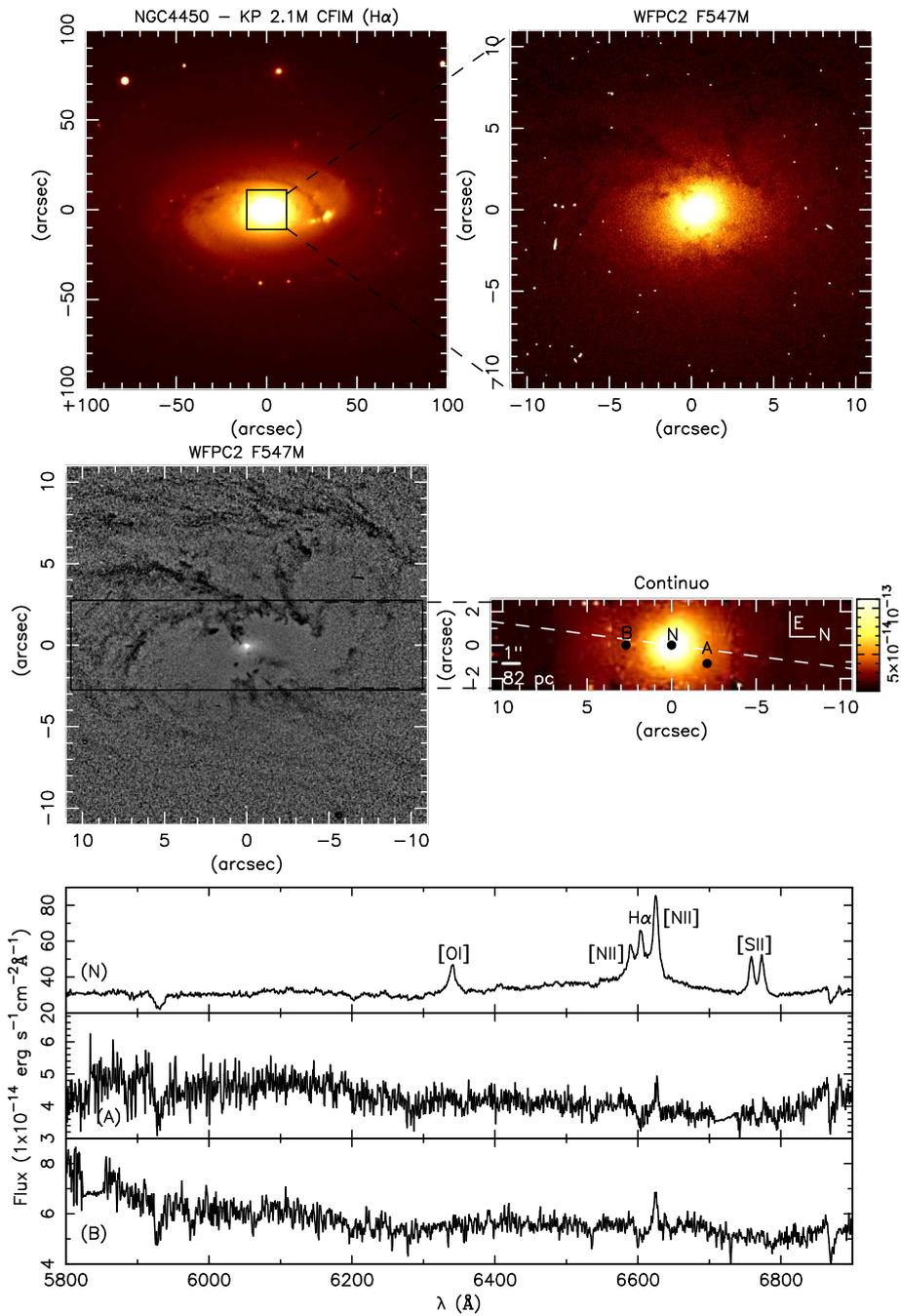


Figura 6.1: Acima: Esquerda - Imagem em grande escala em H α de NGC 4450 onde o quadrado central indica o campo observado com a WFPC2; Direita - Imagem obtida com a WFPC2 usando o filtro F547M. Centro: Esquerda - mapa de estrutura, onde o retângulo central indica o campo das observações com a IFU; Direita - Mapa de contínuo obtido a partir de dados da IFU. Abaixo: Espectros correspondentes as posições N, A e B indicadas no mapa de contínuo. A linha tracejada no mapa de contínuo representa o eixo maior da galáxia.

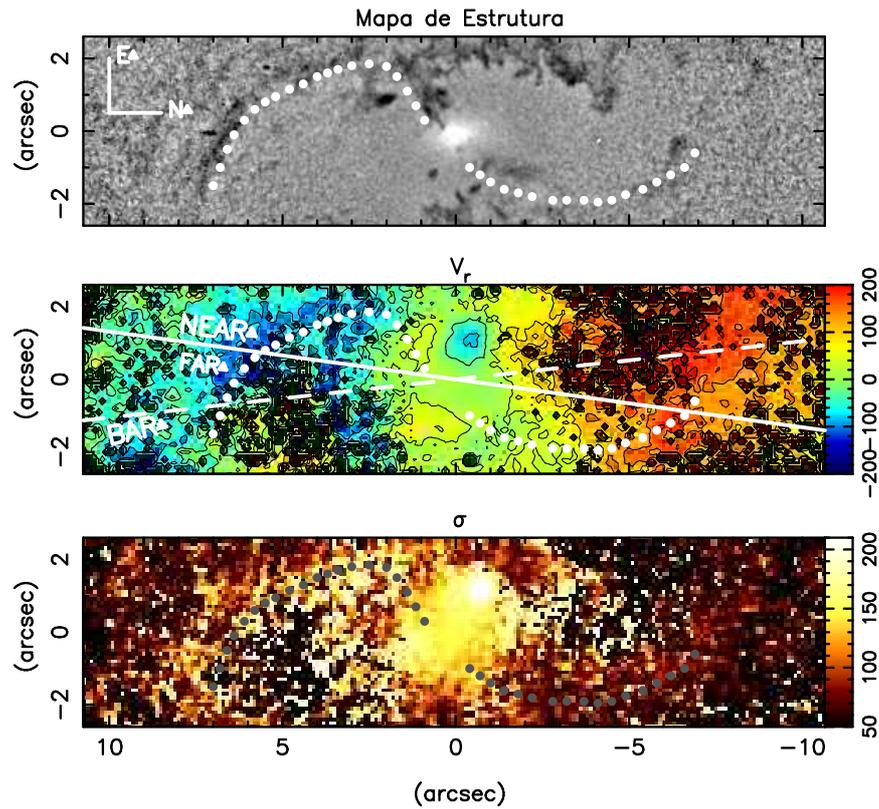


Figura 6.2: O painel de cima mostra o mapa de estrutura para a galáxia. O painel central mostra o campo de velocidades (km s^{-1}) e o painel de baixo mostra a dispersão de velocidades (km s^{-1}), ambos para a linha $[\text{N II}] \lambda 6585,27 \text{ \AA}$. NEAR e FAR representam os lados próximo e distante da galáxia, respectivamente. A linha sólida representa o eixo maior da galáxia, a linha tracejada representa a barra da galáxia (Menéndez-Delmestre et al. 2007) e os pontos brancos sinalizam filamentos de poeira vistos no mapa de estrutura.

No mapa de estrutura desta galáxia, se observa alguns filamentos de poeira, estando dois dos filamentos mais proeminentes marcadas com pontos brancos na Fig. 6.2.

No campo de velocidades radiais, observamos um desvio para o azul em uma pequena região, logo acima (a leste) do núcleo, na Fig. 6.2. As velocidades nesta região são em torno de 100 km s^{-1} mais negativas que no entorno. Co-espacialmente a esta região é observado um aumento no valor de σ , o que sugere que o gás nesta região está mais perturbado. Como a região discutida encontra-se no lado próximo da galáxia, atribuímos estas velocidades mais negativas a um *outflow*, que introduziria perturbações na vizinhança e explicaria também o aumento na dispersão de velocidades observado. Alternativamente, este *outflow* pode estar direcionado para fora do plano.

Aparentes desvios para o azul estão associados à estrutura delineada por pontos brancos a sudeste do núcleo e desvios para o vermelho à estrutura a noroeste do núcleo. Nota-se um aparente aumento na dispersão de velocidades co-espacial com estas estruturas, sugerindo que elas estão associadas a choques, que poderiam remover momentum angular para permitir um *inflow* em direção ao núcleo, que não é evidente nas proximidades do núcleo, mas é sugerido pelos *redshifts* e *blueshifts* mais externos.

6.2 Estimativa da massa do buraco negro central e da taxa de acreção

Utilizando a relação $M-\sigma$ (Tremaine et al. 2002) e uma dispersão de velocidade das estrelas do bojo de $129,6 \text{ km s}^{-1}$ (valor obtido na base de dados do hyperleda), obtemos para a massa do buraco negro central:

$$M_{BH} = 2,36 \times 10^7 M_{\odot} \quad (6.1)$$

Para estimar a taxa de acreção de massa, usamos a expressão:

$$\dot{m} = \frac{L_{bol}}{c^2 \eta} \quad (6.2)$$

onde η é a eficiência da conversão da energia da massa de repouso do material acretado em radiação. As galáxias LINERS, como NGC 4450, possuem um valor típico para $\eta \approx 0,01$. Usando este valor para η , sendo o fluxo em raios X de $f_X = 9,839 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (Halderson et al. 2001) e a luminosidade bolométrica $L_B \approx 10L_X$, obtemos uma taxa de acreção de $\dot{m} = 5,85 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$.

Capítulo 7

Considerações Finais

Nos capítulos 3 a 6 apresentamos mapas da cinemática do gás na região circumnuclear de quatro galáxias com atividade nuclear, assim como discussões sobre estes mapas. Apresentamos neste capítulo um sumário dos principais resultados, assim como perspectivas de continuidade deste trabalho.

7.1 Sumário e Conclusões

Obtivemos espectros bidimensionais na região espectral em torno da linha $H\alpha$ para a região central das galáxias ativas NGC 1566, M 81, NGC 3982 e NGC 4450 com a IFU do instrumento GMOS, instalado nos telescópios Gemini. Obtivemos mapas de dispersão de velocidade e velocidade radial do gás a partir de ajustes dos perfis das linhas de emissão $H\alpha$, [N II] em 6585,27 Å e [S II] em 6718,29 e 6730,81 Å.

O objetivo deste trabalho foi de melhor compreender a importância das estruturas espirais como agentes de transferência de matéria das partes externas às partes internas das galáxias para alimentar o buraco negro central. Os resultados do nosso trabalho mostram que *inflows* e *outflows* de gás, assim como distorções nas linhas

de isovelocidade e aumentos na dispersão de velocidades, aparecem muitas vezes relacionados a filamentos de poeira vistos no mapa de estrutura. Isto indica que as estruturas espirais, mapeadas pelos filamentos de poeira vistos no mapa de estrutura, podem atuar como meios de levar matéria das regiões mais externas da galáxia até as regiões mais internas para alimentar o buraco negro central.

Os principais resultados deste trabalho são os seguintes:

- Para NGC 1566, ajustamos um modelo cinemático ao campo de velocidades observado. O mapa de resíduos (campo de velocidades observado-modelado) mostrou uma região em *blueshift* no lado distante da galáxia, que interpretamos como sendo um *inflow* de gás. O mapa de resíduos mostrou também um *outflow* no lado distante da galáxia, parcialmente co-espacial a uma emissão estendida em [O III], que acreditamos estar relacionada a este outflow.
- Obtivemos a cinemática estelar para a galáxia M 81 a partir de um intervalo espectral não usual para medidas de cinemática estelar. O campo de velocidade das estrelas mostrou-se dominado por rotação e semelhante ao campo de velocidades observado para a galáxia em larga escala. A dispersão de velocidades das estrelas do bojo por nós obtida, em torno de 180 km s^{-1} , concorda com os valores encontradas na literatura (Vega Beltrán et al. 2001, Nelson & Whittle 1995). O mapa de resíduos para esta galáxia mostrou que o lado distante da galáxia está *blueshifted*, o que interpretamos como um *inflow* de gás. No lado próximo da galáxia, observamos uma região com um pequeno desvio para o vermelho, que interpretamos como um *inflow*.
- Para as galáxias NGC 4450 e NGC 3982, comparamos o campo de velocidades e mapa de dispersão de velocidades ao mapa de estrutura, com o objetivo de encontrar relações entre distorções nas linhas de isovelocidade e aumentos na

dispersão de velocidades com filamentos de poeira no mapa de estrutura. Para NGC 3982, observamos, no lado distante da galáxia, uma região com velocidades mais negativas que a sua vizinhança relacionada a um dos braços espirais visto no mapa de estrutura. Co-espacialmente a esta região, observamos, também, um pequeno aumento na dispersão de velocidades. Interpretamos este desvio para o azul visto na região citada como um fluxo de gás em direção ao centro, ao longo do braço espiral. Para NGC 4450, encontramos um desvio para o azul em uma região a leste do núcleo. Co-espacialmente a esta região observamos também um aumento na dispersão de velocidades. Interpretamos este desvio para o azul como sendo um *outflow*. Também são observados aparentes aumentos de velocidade e dispersão de velocidades associados a filamentos no mapa de estrutura em regiões mais distantes do núcleo.

- Para as galáxias NGC 1566 e M 81, estimamos o fluxo de gás em direção ao centro. Para NGC 1566, obtivemos um fluxo de $\phi \approx 1,3 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Este valor é um pouco menor do que o necessário para produzir a energia emitida pelo AGN da galáxia. Porém, o fluxo estimado corresponde apenas ao gás ionizado, que é apenas uma fração do gás total que está fluindo em direção ao núcleo. Para M 81, estimamos o fluxo como sendo de $\phi \approx 1,15 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$, que é suficiente para produzir a luminosidade do núcleo. Estes valores de fluxo são próximos ao valor estimado para a galáxia NGC 6951, $\phi \approx 8 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ (Storchi-Bergmann et al. 2007).
- Em todos os casos, os campos de velocidades do gás apresentam padrões de rotação com algumas distorções, o que não pode ser reproduzido por um modelo de rotação simples. A presença destas distorções é devida a componentes não circulares, que variam de objeto para objeto. Observamos que estas distorções

geralmente estão associadas a aumentos na dispersão de velocidades e a filamentos de poeira vistos no mapa de estrutura.

7.2 Perspectivas

Como continuidade deste trabalho, pretendemos estender a análise da cinemática estelar as outras galáxias da amostra. Com isso, poderemos analisar em maiores detalhes a cinemática do gás e das estrelas e assim construir um cenário físico mais completo das regiões internas destas galáxias. Em particular, iniciamos uma análise dos cubos de dados utilizando a técnica de PCA para investigar sua aplicabilidade para obtenção de informação sobre a cinemática do gás. Uma expansão deste trabalho para mais objetos também é necessária, a fim de uma maior compreensão do mecanismo de alimentação do buraco negro central e do papel das estruturas espirais circumnucleares como agentes responsáveis por levar o gás de dimensões galácticas até a região nuclear.

Referências Bibliográficas

- [1] ADLER, D. S.; WESTPFAHL, D. J. HI in M81. I. Large Scale Structure and Spiral Density Waves. **Astronomical Journal**, v. 111, p. 735–+, February 1996.
- [2] AGÜERO, E. L.; DÍAZ, R. J.; BAJAJA, E. NGC 1566: Spectroscopy of a symmetric system with Seyfert nucleus. **Astronomy and Astrophysics**, v. 414, p. 453–461, February 2004.
- [3] ALLOIN, D.; PELAT, D.; PHILLIPS, M.; WHITTLE, M. Recent spectral variations in the active nucleus of NGC 1566. **Astrophysical Journal**, v. 288, p. 205–220, January 1985.
- [4] BARBOSA, F. K. B.; STORCHI-BERGMANN, T.; CID FERNANDES, R.; WINGE, C.; SCHMITT, H. Gemini/GMOS Integral Field Unit stellar kinematics of the nuclear region of six nearby active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, p. 777–+, August 2006.
- [5] BINNEY, J.; TREMAINE, T. **Galactic Dynamics**: Princeton Series in Astrophysics, Princeton Univ. Press, New Jersey, 1988.
- [6] BOTTEMA, R. The stellar velocity dispersion of the spiral galaxies NGC 1566 and NGC 2815. **Astronomy and Astrophysics**, v. 257, p. 69–84, April 1992.
- [7] CAPPELLARI, M.; EMSELLEM, E. Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 138–147, February 2004.
- [8] Cheng, K. P.; Collins, N.; Angione, R.; Talbert, F.; Hintzen, P.; Smith, E. P.; Stecher, T.; The UIT Team, , editores. **Uv/visible Sky Gallery on CDROM**, 1997.

- [9] DEVEREUX, N.; FORD, H.; TSVETANOV, Z.; JACOBY, G. STIS Spectroscopy of the Central 10 Parsecs of M81: Evidence for a Massive Black Hole. **Astronomical Journal**, v. 125, p. 1226–1235, March 2003.
- [10] FATHI, K.; STORCHI-BERGMANN, T.; RIFFEL, R. A.; WINGE, C.; AXON, D. J.; ROBINSON, A.; CAPETTI, A.; MARCONI, A. Streaming Motions toward the Supermassive Black Hole in NGC 1097. **Astrophysical Journal Letters**, v. 641, p. L25–L28, April 2006.
- [11] FERRARESE, L.; MERRITT, D. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 539, p. L9–L12, August 2000.
- [12] FRANK, J.; KING, A.; RAINE, D. J. **Accretion Power in Astrophysics: Third Edition**: Accretion Power in Astrophysics, by Juhan Frank and Andrew King and Derek Raine, pp. 398. ISBN 0521620538. Cambridge, UK: Cambridge University Press, February 2002., February 2002.
- [13] GARCÍA-BURILLO, S.; COMBES, F.; ECKART, A.; TACCONI, L. J.; HUNT, L. K.; LEON, S.; BAKER, A. J.; ENGLMAIER, P.; BOONE, F.; SCHINNERER, E.; NERI, R. NUGA: The IRAM Survey of AGN Spiral Hosts. **Astronomy and Astrophysics**, v. 407, p. 485–502, August 2003a.
- [14] GARCÍA-BURILLO, S.; COMBES, F.; HUNT, L. K.; BOONE, F.; BAKER, A. J.; TACCONI, L. J.; ECKART, A.; NERI, R.; LEON, S.; SCHINNERER, E.; ENGLMAIER, P. Molecular Gas in Nuclei of Galaxies (NUGA). I. The counter-rotating LINER NGC 4826. **Astronomy and Astrophysics**, v. 407, p. 485–502, August 2003b.
- [15] GARCÍA-BURILLO, S.; COMBES, F.; SCHINNERER, E.; BOONE, F.; HUNT, L. K. Molecular gas in Nuclei of Galaxies (NUGA). IV. Gravitational torques and AGN feeding. **Astronomy and Astrophysics**, v. 441, p. 1011–1030, October 2005.
- [16] GEBHARDT, K.; BENDER, R.; BOWER, G.; DRESSLER, A.; FABER, S. M.; FILIPPENKO, A. V.; GREEN, R.; GRILLMAIR, C.; HO, L. C.; KORMENDY,

- J.; LAUER, T. R.; MAGORRIAN, J.; PINKNEY, J.; RICHSTONE, D.; TREMAINE, S. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. **Astrophysical Journal Letters**, v. 539, p. L13–L16, August 2000.
- [17] GOAD, J. W. Kinematics of the gas in the nuclear disk of M81. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 32, p. 89–113, September 1976.
- [18] HALDERSON, E. L.; MORAN, E. C.; FILIPPENKO, A. V.; HO, L. C. The Soft X-Ray Properties of Nearby Low-Luminosity Active Galactic Nuclei and their Contribution to the Cosmic X-Ray Background. **Astronomical Journal**, v. 122, p. 637–652, August 2001.
- [19] HECKMAN, T. M. An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v. 87, p. 152–164, July 1980.
- [20] HO, L. C.; FILIPPENKO, A. V.; SARGENT, W. L. W. A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 112, p. 315–+, October 1997.
- [21] KENNICUTT, R. C., JR.; ARMUS, L.; BENDO, G.; CALZETTI, D.; DALE, D. A.; DRAINE, B. T.; ENGELBRACHT, C. W.; GORDON, K. D.; GRAUER, A. D.; HELOU, G.; HOLLENBACH, D. J.; JARRETT, T. H.; KEWLEY, L. J.; LEITHERER, C.; LI, A.; MALHOTRA, S.; REGAN, M. W.; RIEKE, G. H.; RIEKE, M. J.; ROUSSEL, H.; SMITH, J.-D. T.; THORNLEY, M. D.; WALTER, F. SINGS: The SIRTf Nearby Galaxies Survey. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 115, p. 928–952, August 2003.
- [22] KILBORN, V. A.; KORIBALSKI, B. S.; FORBES, D. A.; BARNES, D. G.; MUSGRAVE, R. C. A wide-field HI study of the NGC 1566 group. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 356, p. 77–88, January 2005.
- [23] MALKAN, M. A.; GORJIAN, V.; TAM, R. A Hubble Space Telescope Imaging Survey of Nearby Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 117, p. 25–+, July 1998.

- [24] MENÉNDEZ-DELMESTRE, K.; SHETH, K.; SCHINNERER, E.; JARRETT, T. H.; SCOVILLE, N. Z. A Near-Infrared Study of 2MASS Bars in Local Galaxies: An Anchor for High-Redshift Studies. **Astrophysical Journal**, v. 657, p. 790–804, March 2007.
- [25] MUNDELL, C. G.; SHONE, D. L. Gas dynamics in the barred Seyfert galaxy NGC 4151 - I. HI streaming shocks and inflow along the bar. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 304, p. 475–480, April 1999.
- [26] NARAYAN, R. Low-Luminosity Accretion in Black Hole X-Ray Binaries and Active Galactic Nuclei. **Astrophysics and Space Science**, v. 300, p. 177–188, November 2005.
- [27] NELSON, C. H.; WHITTLE, M. Stellar and Gaseous Kinematics of Seyfert Galaxies. I. Spectroscopic Data. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 99, p. 67–+, July 1995.
- [28] NEMMEN, R. S.; STORCHI-BERGMANN, T.; YUAN, F.; ERACLEOUS, M.; TERASHIMA, Y.; WILSON, A. S. Radiatively Inefficient Accretion Flow in the Nucleus of NGC 1097. **Astrophysical Journal**, v. 643, p. 652–659, June 2006.
- [29] OSTERBROCK, D. E. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**: Research supported by the University of California, John Simon Guggenheim Memorial Foundation, University of Minnesota, et al. Mill Valley, CA, University Science Books, 1989, 422 p., 1989.
- [30] PASTORIZA, M.; GEROLA, H. Spectral Variation in the Seyfert Galaxy NGC 1566. **Astrophysical Letters**, v. 6, p. 155–+, July 1970.
- [31] PATUREL, G.; PETIT, C.; PRUGNIEL, P.; THEUREAU, G.; ROUSSEAU, J.; BROUTY, M.; DUBOIS, P.; CAMBRÉSY, L. HYPERLEDA. I. Identification and designation of galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 412, p. 45–55, December 2003.
- [32] PATUREL, G.; TEERIKORPI, P.; THEUREAU, G.; FOUQUÉ, P.; MUSELLA, I.; TERRY, J. N. Calibration of the distance scale from galactic Cepheids. II. Use of the HIPPARCOS calibration. **Astronomy and Astrophysics**, v. 389, p. 19–28, July 2002.

- [33] PEIMBERT, M.; TORRES-PEIMBERT, S. Physical conditions in the nucleus of M81. **Astrophysical Journal**, v. 245, p. 845–856, May 1981.
- [34] PETERSON, B. M. **An Introduction to Active Galactic Nuclei**: Cambridge University Press, 1997.
- [35] PHILLIPS, M. M.; CHARLES, P. A.; BALDWIN, J. A. Nearby galaxies with Seyfert-like nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 266, p. 485–501, March 1983.
- [36] RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; WINGE, C.; MCGREGOR, P. J.; BECK, T.; SCHMITT, H. Mapping of molecular gas inflow towards the Seyfert nucleus of NGC 4051 using Gemini NIFS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 385, p. 1129–1142, April 2008.
- [37] ROTS, A. H. Distribution and kinematics of neutral hydrogen in the spiral galaxy M 81. II - Analysis. **Astronomy and Astrophysics**, v. 45, p. 43–55, December 1975.
- [38] SÁNCHEZ, F. M.; DAVIES, R. I.; GENZEL, R.; TACCONI, L. J.; EISENHAUER, F.; HICKS, E. K. S.; FRIEDRICH, S.; STERNBERG, A. Molecular Gas Streamers Feeding and Obscuring the Active Nucleus of NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 691, p. 749–759, January 2009.
- [39] SCHMITT, H. R.; KINNEY, A. L. A Comparison between the Narrow-Line Regions of Seyfert 1 and Seyfert 2 Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 463, p. 498–+, June 1996.
- [40] SEYFERT, C. K. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 97, p. 28, January 1943.
- [41] SHOBBROOK, R. R. Southern groups and clusters of galaxies. I, Spectra and radial velocities of nineteen southern galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 131, p. 293–+, 1966.
- [42] SIMÕES LOPES, R. D.; STORCHI-BERGMANN, T.; DE FÁTIMA SARAIVA, M.; MARTINI, P. A Strong Correlation between Circumnuclear Dust and Black Hole Accretion in Early-Type Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 655, p. 718–734, February 2007.

- [43] STORCHI-BERGMANN, T.; DORS, O. L., JR.; RIFFEL, R. A.; FATHI, K.; AXON, D. J.; ROBINSON, A.; MARCONI, A.; ÖSTLIN, G. Nuclear Spirals as Feeding Channels to the Supermassive Black Hole: The Case of the Galaxy NGC 6951. **Astrophysical Journal**, v. 670, p. 959–967, December 2007.
- [44] TREMAINE, S.; GEBHARDT, K.; BENDER, R.; BOWER, G.; DRESSLER, A.; FABER, S. M.; FILIPPENKO, A. V.; GREEN, R.; GRILLMAIR, C.; HO, L. C.; KORMENDY, J.; LAUER, T. R.; MAGORRIAN, J.; PINKNEY, J.; RICHSTONE, D. The Slope of the Black Hole Mass versus Velocity Dispersion Correlation. **Astrophysical Journal**, v. 574, p. 740–753, August 2002.
- [45] URRY, C. M.; PADOVANI, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 107, p. 803–+, September 1995.
- [46] 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.
- [47] VEGA BELTRÁN, J. C.; PIZZELLA, A.; CORSINI, E. M.; FUNES, J. G.; ZEILINGER, W. W.; BECKMAN, J. E.; BERTOLA, F. Kinematic properties of gas and stars in 20 disc galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 374, p. 394–411, August 2001.
- [48] YUAN, F. Advection-dominated Accretion: From Sgr A* to Other Low-luminosity AGNs. In: THE CENTRAL ENGINE OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI, Ho, L. C.; Wang, J.-W., editores, v. 373 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 95–+, October 2007.