

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

---

# **Alimentação do Buraco Negro Supermassivo no Núcleo de Galáxias Ativas**

Allan Schnorr Müller

---

Tese de doutorado realizada sob orientação da Professora Dra. Thaisa Storchi Bergmann e co-orientação do Professor Dr. Fabricio Ferrari (Fundação Universidade de Rio Grande) e apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre

Junho, 2013

# 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 longo dos últimos seis anos;
- Ao Fabricio que, com o que ensinou, enriqueceu este trabalho;
- Aos colegas, antigos e atuais, da sala M203, pelo ambiente agradável e pelo convívio prazeroso ao longo desses anos;

Enfim, agradeço a todos que colaboraram na realização deste trabalho.

Allan Schnorr Müller

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul*  
*Junho 2013*

# Resumo

Apresentamos mapas bidimensionais (2D) para a cinemática do gás e das estrelas e fluxo das linhas de emissão na região central (algumas centenas de parsecs) das galáxias ativas M 81, NGC 1667, NGC 2110 e NGC 7213. As observações foram feitas com a Unidade de Campo Integral (IFU) do GMOS (Gemini Multi-Object Spectrograph) nos telescópios Gemini. Obtivemos campos de velocidades, mapas de dispersão de velocidades e mapas de fluxos pelo ajuste das linhas de emissão do gás  $H\alpha$ ,  $[NII] \lambda 6584\text{\AA}$  e  $[SII] \lambda\lambda 6717, 31\text{\AA}$ . Obtivemos medidas da cinemática estelar a partir da aplicação da técnica pPXF. Utilizamos modelagens da cinemática estelar e do gás, além de técnicas de PCA, com o objetivo de detectar movimentos não circulares do gás e investigar a natureza desses movimentos. Detectamos influxos de gás em todas as quatro galáxias e ejeções de gás nas galáxias NGC 2110 e M 81. Verificamos que movimentos não circulares interpretados como influxos de gás se relacionam a espirais e filamentos associados a poeira vista em mapas de estrutura. Obtivemos taxas de influxo de massa para todas as galáxias e taxas de ejeções de massa para a galáxia NGC 2110 e comparamos estes resultados à taxa de acreção de matéria de cada galáxia. Encontramos que as taxas de influxo de gás ionizado variam de 0,01 a  $1 M_{\odot}/\text{ano}$  e são, em todos os casos, maiores que a taxa de acreção, o que sugere que a maior parte desse gás se acumulará na região central. Na galáxia M 81, onde a razão entre a taxa de influxo de gás ionizado e a taxa de acreção é a menor, estimamos que em um período de  $10^7$  anos uma quantidade de  $10^4 M_{\odot}$  de gás ionizado terá se acumulado no centro da galáxia. Na galáxia NGC 1667, onde observamos a maior razão entre a taxa de influxo de gás ionizado e a taxa de acreção, estimamos que, em igual período,  $10^7 M_{\odot}$  de gás ionizado terão se acumulado nos 800 pc centrais. É importante ressaltar que esses valores são apenas um limite inferior, já que se referem somente a observações de gás ionizado e que influxo de gás molecular e neutro também deve ocorrer. Com base nesses resultados, concluímos que o provável destino desse gás será a formação de novas estrelas.

# Conteúdo

<b>Agradecimentos</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>Conteúdo</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>1 Introdução</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Modelo unificado . . . . .	2
1.2 Coevolução entre o buraco negro central e a galáxia hospedeira . . . . .	7
1.3 Alimentação do buraco negro central . . . . .	8
1.4 Objetivos do trabalho . . . . .	11
<b>2 Amostra e Observações</b> . . . . .	<b>13</b>
2.1 A amostra . . . . .	13
2.1.1 M81 . . . . .	14
2.1.2 NGC 1358 . . . . .	14
2.1.3 NGC 1566 . . . . .	14
2.1.4 NGC 1667 . . . . .	15
2.1.5 NGC 2110 . . . . .	15
2.1.6 NGC 2787 . . . . .	16
2.1.7 NGC 3081 . . . . .	16
2.1.8 NGC 7213 . . . . .	16
2.2 Observações . . . . .	17
2.3 Redução dos dados . . . . .	19

<b>3</b>	<b>Metodologia</b> . . . . .	<b>20</b>
3.1	Medida das linhas de emissão . . . . .	20
3.2	Medida da cinemática estelar . . . . .	21
3.3	Modelos de rotação . . . . .	22
3.4	Análise de Componente Principal . . . . .	24
3.5	Deprojeção do campo de velocidades . . . . .	26
3.5.1	Recuperando $v_{\varpi}$ . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Resultados</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b> . . . . .	<b>30</b>
5.1	Sumário . . . . .	30
5.2	Conclusões . . . . .	37
5.3	Perspectivas para o futuro . . . . .	38
	<b>Bibliografia</b> . . . . .	<b>40</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Características das galáxias da amostra . . . . .	14
2.2	Detalhes das observações . . . . .	17

# Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática do modelo unificado para AGNs . . . . .	4
1.2	Representação artística de um AGN . . . . .	5
1.3	Representação esquemática de um AGN segundo propostas correntes	6
2.1	Representação esquemática de um cubo de dados . . . . .	18
3.1	Sistemas de coordenadas do plano do céu e da galáxia. . . . .	26

# 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, o primeiro (Seyfert 1943) a notar que havia várias galáxias que apresentavam características similares, formando um grupo diferenciado. Entre as características que levaram Seyfert a selecionar estas galáxias estavam 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.

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 à largura observada 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  $5000 \text{ km s}^{-1}$ , 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) e 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 ótico 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 ótico 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  $[\text{O II}] \lambda 3727 \text{ \AA}$ ,  $[\text{O I}] \lambda 6300 \text{ \AA}$ ,  $[\text{N II}] \lambda 6585 \text{ \AA}$  e  $[\text{S II}] \lambda\lambda 6718, 6731 \text{ \AA}$  são relativamente mais fortes quando comparadas com as linhas do  $[\text{O III}] \lambda 5007 \text{ \AA}$ ,  $[\text{Ne III}] \lambda 3869 \text{ \AA}$  e  $\text{He II} \lambda 4686 \text{ \AA}$ , 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 ideia de que a energia emitida por um AGN é produzida pela acreção de matéria a um buraco negro super massivo central (massas

típicas entre  $1 \times 10^5$  e  $1 \times 10^9 M_{\odot}$ ) 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. Logo, galáxias ativas seriam aquelas em que o buraco negro central está acretando matéria, através de um disco de acreção.

O chamado Modelo Unificado (Urry & Padovani 1995) ilustra a física do AGN de um modo idealizado. 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 que absorve a radiação emitida pelas regiões internas ao toro e re-emite-a em comprimentos de onda na faixa do infravermelho. 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 também 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. As detecções de componentes largas em galáxias Seyfert 2 em luz polarizada (Antonucci & Miller 1985, Moran et al. 2000, Nagao et al. 2004, Moran et al. 2007, Tran 2010) e de uma estrutura de poeira na região central de AGNs (Malkan 1986, Barvainis 1987, Kishimoto et al. 2007, Riffel et al. 2009, Mor et al. 2009, Deo et al. 2011) comprovam esse cenário.

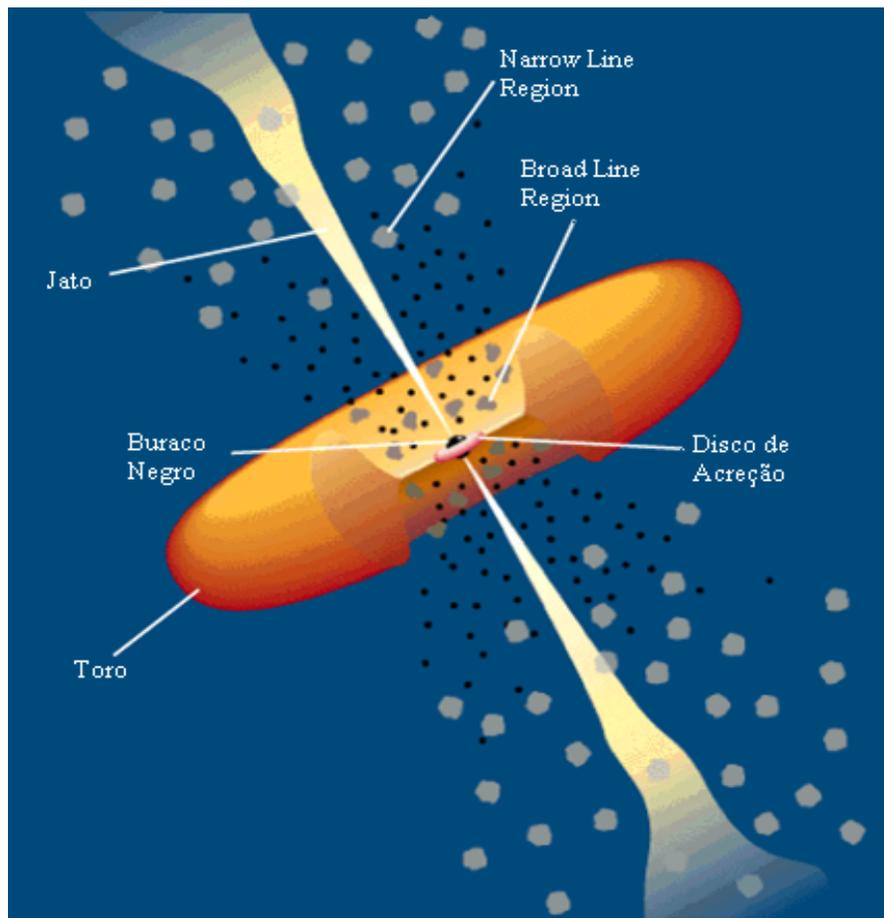


Figura 1.1: Figura de Urry & Padovani (1995) com modificações.

A exata natureza dessa estrutura, e se ela possui mesmo uma forma toroidal como proposto pelo modelo unificado, porém, ainda são questões em debate. Por exemplo, alguns autores sugerem que o toro é composto por um aglomerado de nuvens opticamente espessas contendo poeira, arranjadas de modo similar ao proposto pelo modelo unificado (Nenkova et al. 2008)(veja Fig. 1.2), enquanto outros autores vão além e sugerem que o toro é na verdade apenas uma região populada por nuvens opticamente espessas e com muita poeira que faz parte de um vento do disco de acreção (Elitzur & Shlosman 2006), ou um disco de gás assimétrico ou excêntrico que lentamente precessa em torno do buraco negro central (Hopkins et al. 2011). Elvis (2012) propõe que o obscurecimento de AGNs, em vez de ocorrer em uma estrutura

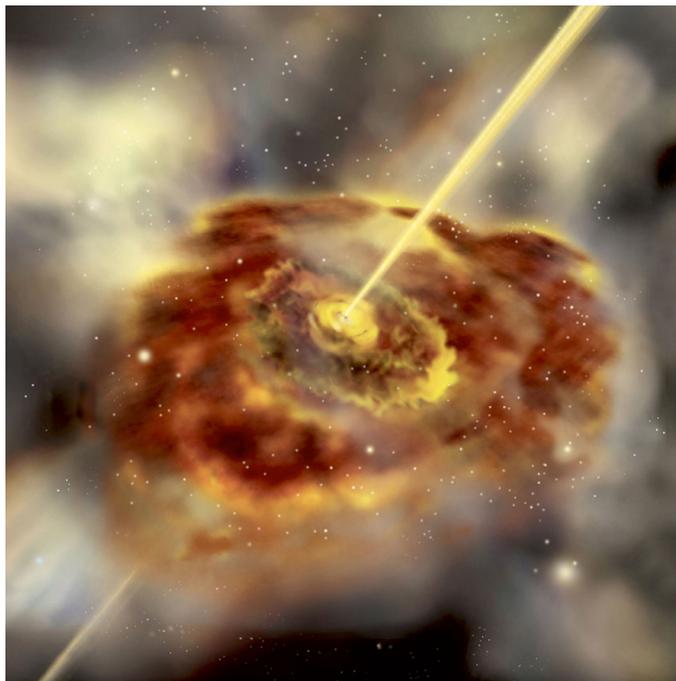


Figura 1.2: Representação artística de um AGN. No centro, o buraco negro central é cercado por um disco de acreção com material em rápida rotação. Externo a este disco, encontra-se um toro de gás e poeira. Os jatos são emitidos em um ângulo reto em relação ao plano do disco. Crédito: ESO.

única como um toro, ocorre em três diferentes regiões que afetam diferentes faixas espectrais:

- Uma região mais interna, sem poeira, que absorve raios-X criando rápidos eclipses, provavelmente formada por nuvens da BLR;
- Uma região de escala intermediária, onde há poeira, e que reprocessa grande parte da radiação proveniente do AGN em emissão termal da poeira;
- Regiões externas, em escalas de 0,1–1 kpc, conectadas ao disco da galáxia hospedeira ou a filamentos de poeira;

Uma concepção mais atual de um AGN assim como a escala das estruturas que o compõem podem ser vistos na figura 1.3.

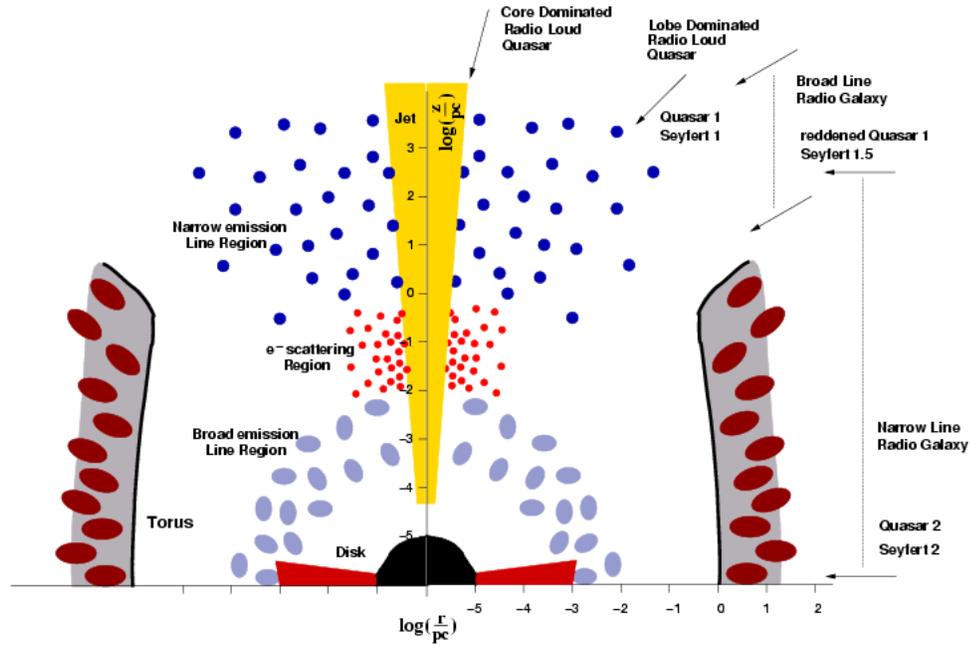


Figura 1.3: Figura de Zier & Biermann (2002) mostrando as diferentes estruturas que compõem um AGN e suas dimensões típicas em escala logarítmica.

Em um trabalho recente, Müller-Sánchez et al. (2013) observaram três galáxias com núcleos LINER e encontraram que, nos 50 pc centrais destas galáxias, uma estrutura de gás molecular geometricamente e opticamente espessa está presente. Essa estrutura é caracterizada por uma razão entre a máxima velocidade de rotação ( $V$ ) e a dispersão de velocidades ( $\sigma$ ) de  $V/\sigma < 1$ , assim como uma densidade de coluna de  $N_H > 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ . Em galáxias LINER, a região em que  $V/\sigma < 1$  é 9 vezes menor do que em galáxias Seyfert, e as densidades de coluna são  $\approx 3$  menores. Os autores interpretaram essas diferenças como um sinal do desaparecimento gradual do toro conforme há uma diminuição no nível de atividade do AGN.

## 1.2 Coevolução entre o buraco negro central e a galáxia hospedeira

A descoberta de correlações entre a massa do buraco negro supermassivo e propriedades da galáxia hospedeira, como a dispersão de velocidades, massa e luminosidade do bojo, (Magorrian et al. 1998, Ferrarese & Merritt 2000, Gebhardt et al. 2000, Hopkins et al. 2007, Aller & Richstone 2007) motivou o estudo da coevolução entre ambos. Porém, até o momento, como exatamente se dá essa coevolução ainda é uma questão em aberto. Presentemente, se propõe que a coevolução ocorre através de processos de *feedback*: influxos de gás levariam a um rápido crescimento da massa do buraco negro central até que processos de *feedback*, como ejeções de gás, começariam a ejetar gás e poeira da região nuclear, o que daria origem as correlações observadas (Silk & Rees 1998, Di Matteo et al. 2005, Murray et al. 2005, Hopkins et al. 2005). Porém, no presente momento, não há uma certeza de quais são os mecanismos envolvidos na alimentação do buraco negro supermassivo e, além disso, o total impacto dos processos de *feedback* na galáxia hospedeira ainda é um tema controverso. Por exemplo, processos de *feedback* são frequentemente citados como os responsáveis por cessar bruscamente a formação estelar em galáxias e pela contínua falta de resfriamento do gás em galáxias massivas (Granato et al. 2004, Scannapieco & Oh 2004, Croton et al. 2006, Hopkins et al. 2009), por outro lado Rosario et al. (2013) encontraram que AGNs são muito mais prováveis de ser encontrados em galáxias que estão ativamente formando estrelas do que em galáxias quiescentes ou galáxias em que a formação estelar cessou recentemente.

Em um trabalho recente, Kormendy & Ho (2013) questionam tanto a origem das correlações entre a massa do buraco negro supermassivo e propriedades da galáxia hospedeira quanto a influência dos processos de *feedback* em galáxias do universo local.

Quanto as correlações, os autores apontam que elas podem emergir naturalmente após vários *mergers*. No caso dos processos de *feedback*, eles apontam que, no universo local, as maiores taxas de formação estelar e de crescimento do buraco negro central são encontradas em galáxias relativamente pouco massivas quando comparadas a galáxias onde esses processos dominavam em *redshift* mais altos. Essas galáxias, em sua maioria, não possuem bojos clássicos e seus buracos negros são alimentados por processos locais, em contraste com *major mergers* de galáxias ricas em gás, comuns no passado, e conseqüentemente o AGN não produz energia o suficiente para influenciar a galáxia hospedeira. Galáxias elípticas ou com bojos clássicos continuam a apresentar uma correlação entre a massa do buraco negro central e propriedades do bojo, mas a física que criou estas correlações não está mais em ação. Nas galáxias elípticas gigantes, onde os buracos negros centrais mais massivos são encontrados, processos de *feedback* ainda estão presentes, porém, eles apenas previnem o resfriamento tanto do gás quente emissor de raios-x no interior dessas galáxias quanto do gás no meio intergaláctico, impedindo nova formação estelar. O crescimento do buraco negro nestes objetos é pequeno. Rosario et al. (2013), após análise de uma amostra de galáxias ativas, encontrou que AGNs são muito mais prováveis de serem encontrados em galáxias que estão ativamente formando estrelas do que em galáxias quiescentes ou galáxias em que a formação estelar cessou recentemente, reforçando o argumento de que processos de *feedback* não são necessariamente poderosos o suficiente para cessar a formação estelar.

### 1.3 Alimentação do buraco negro central

Kormendy et al. (2011) propõem a existência de dois modos de alimentação, (1) um relacionado a um mecanismo de alimentação global, conectado também a formação

do bojo da galáxia hospedeira, proveniente de influxos de grandes quantidades de gás para a região central após um *merger* rico em gás, o que resulta em atividade do tipo quasar e outro (2) estocástico, relacionado a um ou mais mecanismos seculares locais, que resulta em atividade do tipo Seyfert, predominante no universo local.

Quanto a galáxias do universo local, para que gás vindo de regiões distantes alguns kiloparsecs do centro da galáxia possa chegar até a vizinhança do buraco negro central, é necessário que os mecanismos responsáveis pelo transporte removam quase todo seu momento angular. No entanto, não foi encontrado nenhum mecanismo que opere nessa escala de distância. No momento, evidências indicam que não há um mecanismo único a efetuar o transporte do gás, mas sim um conjunto de diferentes mecanismos (Shlosman et al. 1990, Mulchaey & Regan 1997, Martini et al. 2003, Hunt & Malkan 2004, Wada 2004). Em escalas de kiloparsecs, torques gravitacionais, ocasionados por interações com galáxias companheiras e assimetrias como ondas de densidade espirais, barras estelares em larga escala ou discos ovais são os mecanismos mais eficientes (Combes 2003, Kormendy & Kennicutt 2004, García-Burillo et al. 2005). Entretanto, simulações sugerem que gás fluindo em barras se estabelece em anéis nucleares (Piner et al. 1995, Regan & Teuben 2003), usualmente distantes em torno de 1 kpc do núcleo, e influxos dentro destes anéis são pequenos (Piner et al. 1995). A relação entre interações e atividade nuclear também é ainda alvo de debates. Schmitt (2001) encontrou que a presença de companheiras se correlaciona com a formação estelar na região central de galáxias, mas não com a atividade nuclear, porém um estudo mais recente (Cotini et al. 2013) encontrou que a fração de galáxias em interação em uma amostra de galáxias ativas supera a fração em uma amostra de controle.

Estudos teóricos e simulações (Shlosman et al. 1990, Emsellem et al. 2003, Knapen 2005, Emsellem et al. 2006) mostraram que potenciais não axi-simétricos

promovem eficientemente influxos de gás em direção a regiões mais internas da galáxia (Englmaier & Shlosman 2004) e observações mostraram que estruturas como discos de pequena escala ou barras nucleares e braços espirais associados são frequentemente observados no kiloparsec central de galáxias ativas (Erwin & Sparke 1999, Pogge & Martini 2002, Laine et al. 2003). Simões Lopes et al. (2007) mostrou também uma forte correlação entre a presença de estruturas nucleares de poeira (filamentos, espirais e discos) e atividade em galáxias. Martini et al. (2013) estudaram trinta e oito das galáxias presentes na amostra de Simões Lopes et al. (2007) com o intuito de investigar a origem da poeira nuclear. Eles concluíram que a poeira interestelar não tem somente origem na acreção de galáxias satélites ricas em poeira, mas também tem origem no acréscimo contínuo de gás e poeira do meio intergaláctico.

Detecções de influxos de gás em galáxias ativas podem ajudar a elucidar quais são os mecanismos envolvidos no transporte de gás até a vizinhança do buraco negro central. Em grande escala, Adler & Westpfahl (1996) encontraram influxos de gás ao longo de braços espirais da galáxia M 81 e Mundell & Shone (1999) encontraram influxos ao longo de uma barra na galáxia NGC 4151. Um importante avanço recente foi a identificação de influxos em escalas nucleares em gás molecular e ionizado. Em gás ionizado, influxos foram observados na região central das galáxias NGC 1097 (Fathi et al. 2006) e NGC 6951 (Storchi-Bergmann et al. 2007) e em hidrogênio molecular ( $H_2$ ) nas galáxias NGC 1068 (Müller Sánchez et al. 2009), NGC 4051 (Riffel et al. 2008), NGC 1097 (Davies et al. 2009), Mrk 1066 (Riffel & Storchi-Bergmann 2011) e Mrk 79 (Riffel et al. 2013).

## 1.4 Objetivos do trabalho

Como citado anteriormente, o trabalho de Simões Lopes et al. (2007) mostrou uma forte correlação entre estruturas nucleares de poeira e atividade em galáxias. Todas as 34 galáxias *early-type* ativas presentes na amostra apresentam poeira circumnuclear, enquanto apenas 26% das galáxias *early-type* não ativas apresentam poeira circumnuclear. Este resultado sugere que a presença de poeira é uma condição necessária, mas não única, para que haja acreção de matéria ao buraco negro central em galáxias *early-type*. Foi observado também que as estruturas de poeira nestas galáxias estão confinadas, tipicamente, ao kiloparsec central e não são observadas em grande escala. Em galáxias *late-type*, porém, estruturas de poeira foram observadas tanto em galáxias ativas quanto não ativas. Os resultados de Simões Lopes et al. (2007) e as detecções de influxos de gás relacionados a espirais nucleares nas galáxias NGC 1097 (Fathi et al. 2006) e NGC 6951 (Storchi-Bergmann et al. 2007) motivaram esse trabalho.

O principal objetivo é verificar a hipótese de que estruturas nucleares de poeira, em espiral braços espirais nucleares, são traçadores dos mecanismos de alimentação do SMBH, expandindo o número de galáxias onde essa hipótese já foi verificada. Para atingir esse objetivo, o seguinte será feito:

- Medir e mapear a cinemática do gás da região nuclear (kiloparsec central) de uma amostra de galáxias ativas extraída dos trabalhos de Simões Lopes et al. (2007) e Malkan et al. (1998), escolhidas por apresentarem estruturas de poeira nuclear (principalmente espirais, mas também filamentos ou discos);
- Procurar por influxo de gás no kiloparsec central utilizando dados de espectroscopia de campo integral, o que nos permite realizar um mapeamento bidimensional da cinemática do gás;

- Investigar a natureza, mapear a excitação e obter as propriedades físicas do gás, através da razão entre as linhas de emissão;
- Mapear a cinemática das estrelas e compará-la com a do gás como meio de isolar movimentos não circulares do gás – influxo e/ou ejeção de gás;
- Explorar o uso de diferentes técnicas a fim de isolar movimentos não circulares e investigar a natureza destes movimentos, como a modelagem dos campos de velocidades, a técnica de PCA (Steiner et al. 2009);
- Medir a massa do buraco negro central, taxas de influxo e de ejeção de gás a partir da região nuclear.

No capítulo 2 apresentamos propriedades das galáxias que compõem a amostra. No capítulo 3 apresentamos a metodologia. No capítulo 4 apresentamos os resultados e no capítulo 5 apresentamos nossas conclusões.

## Capítulo 2

# Amostra e observações

### 2.1 A amostra

Nossa amostra foi primeiramente constituída de galáxias LINER que apresentam estruturas de poeira nuclear, extraídas do trabalho de Simões Lopes et al. (2007), a fim de estender os estudos de Fathi et al. (2006) e Storch-Bergmann et al. (2007), que demonstraram que estruturas nucleares de poeira estão relacionadas a influxos de matéria, a um número maior de galáxias. Posteriormente, expandimos nossa amostra para incluir outros níveis de atividade nuclear, selecionando galáxias Seyfert 1 e Seyfert 2 apresentando estruturas de poeira entre as presentes nos trabalhos de Simões Lopes et al. (2007) e Malkan et al. (1998). A tabela 2.1 lista o tipo de Hubble, atividade nuclear, distância e escala de cada galáxia (dados obtidos de NED<sup>1</sup>). A seguir listamos alguns resultados de estudos anteriores sobre cada galáxia de nossa amostra:

---

<sup>1</sup>NASA/IPAC extragalactic database

Tabela 2.1: Características das galáxias da amostra.

Galáxia	Tipo	Atividade	Distância (Mpc)	Escala (parsec/arcsec)
M 81	SAab	Sey1/LINER	3,5	17
NGC 1358	SAB(r)0	Seyfert 2	54,6	256
NGC 1566	SABbc	Seyfert 1	20,0	99
NGC 1667	SAB(r)c	Seyfert 2	62,6	295
NGC 2110	SAB0	Seyfert 2	30,2	158
NGC 2787	SB(r)0	LINER	11,0	53
NGC 3081	SAB(r)0	Seyfert 2	29,9	145
NGC 7213	SA(s)a	Seyfert 1	23,6	115

### 2.1.1 M 81

Devido a sua proximidade, o núcleo ativo de M 81 foi objeto de diversos estudos. Descobriu-se que a emissão do AGN varia com o tempo no ótico (Bower et al. 1996), rádio (Ho 1999) e raios-X (Iyomoto & Makishima 2001). O espectro nuclear apresenta linhas de emissão largas no ótico e ultravioleta (Peimbert & Torres-Peimbert 1981). Devereux et al. (1997) observou uma fonte compacta que emite no ótico e ultravioleta e Bietenholz et al. (2000) detectou uma fonte de rádio ultracompacta associada a um jato rádio. A física da acreção do AGN foi estudada por Markoff et al. (2008).

### 2.1.2 NGC 1358

Seu mapa de estrutura em Malkan et al. (1998) mostra que, apesar de NGC 1358 ser classificada como uma galáxia S0, espirais nucleares estão presentes. Além disso, NGC 1358 apresenta uma estrutura em forma de S, vista tanto em [O III] quanto [N II] e  $H\alpha$ , nos 2'' centrais (Mulchaey et al. 1996).

### 2.1.3 NGC 1566

As características espectrais do seu núcleo ativo variam ao longo do tempo (Pastoriza & Gerola 1970, Alloin et al. 1985). Em grande escala, Agüero et al. (2004) observaram

influxos próximos ao eixo menor da galáxia, que podem ser o mecanismo responsável por alimentar o núcleo ativo. Em escalas nucleares, Schmitt & Kinney (1996) observaram uma emissão estendida em [O III], que pode estar relacionada a uma ejeção de gás.

#### 2.1.4 NGC 1667

NGC 1667 possui uma alta luminosidade no infra-vermelho distante (Armus et al. 1990), provavelmente devida a formação estelar nas regiões H II gigantes que cercam o núcleo da galáxia (Gonzalez Delgado & Perez 1997). A galáxia se encontra a uma distância de 62,6 Mpc (NED), o que equivale a uma escala de  $295 \text{ pc arcsec}^{-1}$ . A curva de rotação do gás ao longo do eixo maior obtida por Radovich & Rafanelli (1996) mostra que desvios em relação a pura rotação estão presentes nos  $15''$  centrais.

#### 2.1.5 NGC 2110

NGC 2110 foi objeto de vários estudos em radio, infra-vermelho próximo, ótico, ultravioleta e raios-X. Bradt et al. (1978) classificaram a galáxia como uma *narrow line X-ray galaxy* por causa de sua forte emissão em raios-X. Ela possui um jato-rádio bem definido em forma de s, com uma extensão de  $\approx 4''$  ao longo da direção norte-sul (Ulvestad & Wilson 1983, Nagar et al. 1999). Uma estrutura em forma de S paralela ao jato rádio é observada em imagens de contínuo da galáxia. A parte norte dessa estrutura está relacionada a emissões em [O III] e raios-x “soft” (Evans et al. 2006). Espectroscopia de campo integral dos  $10''$  centrais (González Delgado et al. 2002, Ferruit et al. 2004) mostrou que o campo de velocidades do gás é assimétrico.

### 2.1.6 NGC 2787

NGC 2787 foi objeto de estudo principalmente por apresentar um disco estelar interno a sua barra (Erwin & Sparke 2002, 2003, Erwin et al. 2003). Um estudo de Ho et al. (1997) apresentou a detecção de uma componente larga em  $H\alpha$  no espectro nuclear da galáxia e um estudo de Sarzi et al. (2001) encontrou evidências da existência de um buraco negro com massa de  $\approx 10^8 M_{\odot}$ .

### 2.1.7 NGC 3081

NGC 3081 é uma das galáxias Seyfert 2 que tiveram componentes largas em  $H\alpha$  detectadas em luz polarizada (Moran et al. 2000). Formação estelar está ocorrendo em várias estruturas em forma de anel: um anel de diâmetro 2,3 kpc, um de 11,0 kpc, um anel externo de 26,9 kpc e um pseudo anel de 33,1 kpc de diâmetro (Buta & Purcell 1998, Buta et al. 2004, Byrd et al. 2006).

### 2.1.8 NGC 7213

Espectros da região nuclear da galáxia foram estudados por Filippenko & Halpern (1984) que relataram razões de linha similares às encontradas em galáxias LINER, apesar de NGC 7213 ser classificada como uma galáxia Seyfert 1. Estes autores argumentam que tais razões de linha, são devido a um gás com alta densidade eletrônica ( $\approx 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) e quente ( $T_e \approx 16000 \text{ K}$ ).

Nesta tese apresentamos o resultado para quatro galáxias cujos estudos foram concluídos e já estão sob a forma de artigos científicos:

1. A galáxia LINER M 81;

2. A galáxia Seyfert 2 NGC 1667, cuja cinemática do gás é dominada por influxos de gás;
3. A galáxia Seyfert 2 NGC 2110, cuja cinemática do gás é dominada por ejeções de gás;
4. A galáxia LINER/Seyfert 1 NGC 7213, cuja cinemática do gás é dominada por influxos de gás;

## 2.2 Observações

A tabela 2.2 apresenta algumas informações sobre as observações como o telescópio onde foram realizadas (Gemini Norte (GN) ou Gemini Sul (GS)), a data de cada observação, o tempo de exposição, o código do projeto e o *seeing* no momento de cada observação.

Tabela 2.2: Detalhes das observações.

Galáxia observada	Telescópio	Data da observação	Tempo de exposição (s)	Código do projeto	Seeing (")
M 81	GN	31/12/06	574	GN-2006B-Q-94	0,60
NGC 1358	GS	27/01/11	2100	GS-2010B-Q-19	0,65
NGC 1566	GS	27/09/11	2250	GS-2011B-Q-23	0,55
NGC 1667	GS	26/01/11	2100	GS-2010B-Q-19	0,65
NGC 2110	GS	28/01/11	2100	GS-2010B-Q-19	0,60
NGC 2787	GN	14/02/11	2460	GN-2011A-Q-85	0,60
NGC 3081	GN	14/02/11	2460	GN-2011A-Q-85	0,60
NGC 7213	GS	27/09/11	2250	GS-2011B-Q-23	0,55

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

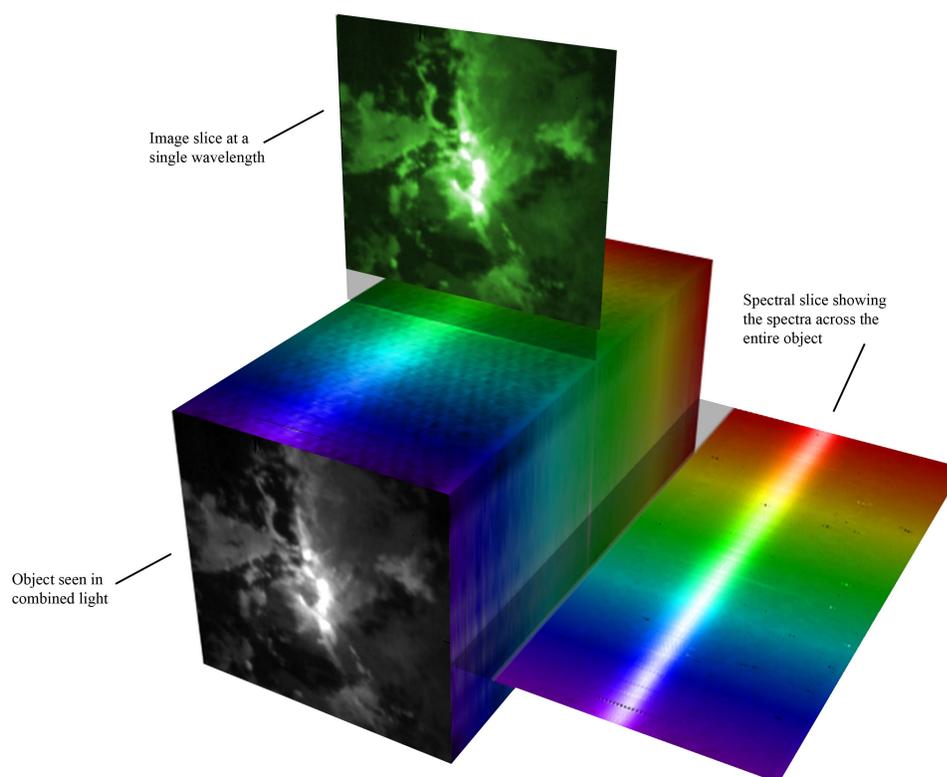


Figura 2.1: Esquematização de um cubo de dados: a cada pixel espacial corresponde um espectro.

um arranjo hexagonal de lentes. 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 espacial

dobra, sendo de  $7'' \times 5''$  e  $3,5'' \times 5''$  nos campos principal e de céu, respectivamente. O 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. Para este trabalho, todas as observações foram feitas no modo de duas fendas.

## 2.3 Redução dos 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 pixels do CCD dividindo-se a imagem por uma 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. Uma vez extraídos, corrige-se pelo “flat-field”. Após isto, foram feitas a subtração do céu, calibração em comprimento de onda e em fluxo. Para a calibração em fluxo, estrelas padrão foram observadas imediatamente após a observação de cada galáxia. 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. A figura 2.1 apresenta a esquematização de um cubo de dados.

# Capítulo 3

## Metodologia

Após a redução de dados, obtivemos as medidas de fluxo nas linhas de emissão, a cinemática do gás emissor e, quando possível, também a das estrelas. Os métodos utilizados para obter essas medidas e analisar os dados estão descritos a seguir.

### 3.1 Medida das linhas de emissão

O número de espectros no cubo de dados resultante da redução é de mais de 6000 por galáxia, o que inviabiliza a medição manual das linhas de emissão. Um *script* em IDL que ajusta Gaussianas às diferentes linhas de emissão foi criado a fim de realizar essas medidas. Mapas bidimensionais para as distribuições de fluxos nas linhas de emissão e razões entre estas linhas, campo de velocidades (obtido do comprimento de onda correspondente ao pico da Gaussiana) e mapas para a dispersão de velocidades ( $\sigma$ , obtida da largura a meia altura da gaussiana, FWHM – *Full Width at Half Maximum*, sendo  $\sigma = \text{FWHM}/2,355$ ) foram obtidos.

## 3.2 Medida da cinemática estelar

A técnica pPXF (*penalized Pixel-Fitting*), descrita em Cappellari & Emsellem (2004), foi utilizada para obter a cinemática estelar a partir das linhas de absorção entre 5600Å e 6200Å. Esta técnica adota um modelo para o espectro da galáxia  $G_{\text{mod}}(x)$ , obtido a partir da convolução do espectro de um *template* de população estelar  $T(x)$  com a distribuição de velocidades ao longo da linha de visada (LSVD - *Line-of-Sight Velocity Distribution*), e rebina os espectro dos *templates* e da galáxia para uma escala linear  $x = \ln\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda. Os parâmetros que melhor ajustam a LSVD são determinados minimizando o  $\chi^2$ , que mede a diferença entre o espectro modelo  $G_{\text{mod}}$  e o espectro observado da galáxia,  $G(x)$ , para o conjunto de  $N$  pixels:

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N r_n^2, \quad (3.1)$$

Onde:

$$r_n = \frac{G_{\text{mod}}(x_n) - G(x_n)}{\Delta G(x_n)}, \quad (3.2)$$

sendo  $\Delta G(x_n)$  o erro em  $G(x_n)$ .

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

$$G_{\text{mod}}(x) = \sum_{k=1}^K w_k [B * T_k](x) + \sum_{l=0}^L b_l P_l(x) \quad w_k \geq 0, \quad (3.3)$$

onde  $T_k$  é o *template*  $k$  da biblioteca de *templates* de população estelar,  $B(x) = L(cx)$  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:

$$L(v) = \frac{e^{-(1/2)y^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[ 1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right], \quad (3.4)$$

onde  $H_m$  são os polinômios de Hermite,  $y = (v - V)/\sigma$ ,  $v = cx$ ,  $V$  é a velocidade radial,  $\sigma$  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. Com estas definições, a minimização do  $\chi^2$  na equação 3.1 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,  $\sigma$ ,  $h_3$  e  $h_4$ , uma vez que truncamos a série acima em  $m = 4$ . O parâmetro  $h_3$  mede desvios assimétricos (como por exemplo asas azuis ou vermelhas dos perfis das linhas), enquanto que  $h_4$  mede desvios simétricos (por exemplo o achatamento) da LSVD em relação a um perfil gaussiano (van der Marel & Franx 1993).

### 3.3 Modelos de rotação

Os mapas de velocidades da região circumnuclear das galáxias estudadas nesse trabalho são, em sua maioria, dominados por rotação e, por este motivo, adotamos modelos analíticos simples de rotação a fim de descrever os campos de velocidade estelar e do gás de cada galáxia. Nosso objetivo é obter parâmetros físicos como a velocidade sistêmica, orientação da linha dos nodos e a posição do centro cinemático, bem como isolar componentes que diferem da rotação para a cinemática do gás. No caso da galáxia M81, assumimos que o gás segue órbitas circulares planas em um

potencial gravitacional de Plummer, dado por (Binney & Tremaine 1988):

$$\Phi = -\frac{GM}{\sqrt{r^2 + a^2}}, \quad (3.5)$$

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

$$v_c^2 = r \frac{d\Phi}{dr} = \frac{r^2 G M}{(r^2 + a^2)^{3/2}}. \quad (3.6)$$

Assumindo que as órbitas estão contidas no plano  $(i, \psi_0)$ , onde  $i$  é a inclinação do disco da galáxia 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  $\psi_0$  é o ângulo de posição da linha dos nodos, pode-se obter uma expressão para a velocidade ao longo da linha de visada (radial). Esta velocidade radial, observada na posição  $(R, \psi)$ , onde  $R$  é a distância radial ao núcleo projetada no plano do céu com o correspondente ângulo de posição  $\psi$  [medido de N ( $0^\circ$ ) para E ( $90^\circ$ )], é dada por (Barbosa et al. 2006):

$$V_r = V_s + \sqrt{\frac{R^2 G M}{(R^2 + A^2)^{3/2}} \frac{\text{sen}(i) \cos(\psi - \psi_0)}{\left(\cos^2(\psi - \psi_0) + \frac{\text{sen}^2(\psi - \psi_0)}{\cos^2(i)}\right)^{3/4}}} \quad (3.7)$$

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

$$\alpha = \sqrt{\cos^2(\psi - \psi_0) + \frac{\text{sen}^2(\psi - \psi_0)}{\cos^2(i)}}. \quad (3.8)$$

No caso das galáxias NGC 1667, NGC 2110 e NGC 7213, o modelo de Plummer não produziu um bom ajuste dos campos de velocidade medidos. Como alternativa, utilizamos a equação para a velocidade de rotação dada por (Bertola et al. 1991):

$$V_c(r) = \frac{Ar}{(r^2 + c^2)^{p/2}} \quad (3.9)$$

No plano do céu a velocidade radial observada em um dado ponto  $(R, \psi)$  é dada por

$$V = V_s + \frac{AR \cos(\psi - \psi_0) \sin(\theta) \cos^p \theta}{\{R^2 [\sin^2(\psi - \psi_0) + \cos^2 \theta \cos^2(\psi - \psi_0)] + c^2 \cos^2 \theta\}^{p/2}} \quad (3.10)$$

onde  $\theta$  é a inclinação do disco ( $\theta = 0$  para um disco *face-on*),  $\psi_0$  é o ângulo de posição da linha dos nodos,  $V_s$  é a velocidade sistêmica,  $R$  é o raio e  $A$ ,  $c$ , e  $p$  são parâmetros.

Os parâmetros livres de ambas as equações 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.

### 3.4 Análise de Componente Principal

Neste trabalho, aplicamos também técnicas de análise de componente principal (*Principal Component Analysis*, daqui em diante PCA) conforme descrito em Steiner et al. (2009). PCA é matematicamente definida como uma transformação linear ortogonal que expressa os dados em um novo sistema de coordenadas (não correlacionado) de modo que a primeira dessas novas coordenadas,  $E_1$  (autovetor 1) contém a maior fração da variância, a segunda variável,  $E_2$ , contém a segunda maior fração e assim por diante. Essas novas coordenadas geradas pela PCA são, por construção, mutuamente ortogonais.

Os elementos da diagonal principal da matriz de covariância  $\mathbf{C}_{cov}$  correspondem à variância de cada uma das variáveis isoladas, enquanto os outros elementos correspondem à covariância entre duas propriedades distintas. A matriz de covariância  $m \times m$  possui  $m$  autovetores,  $E_k$ , cada um associado com um autovalor,  $\lambda_k$ .  $E_k$  são as novas coordenadas não correlacionadas e  $k$  é a ordem do autovetor, que varia de 1 a  $m$ . Os autovetores são ordenados pelo valor decrescente de cada  $\lambda_k$ , que é a variância de cada componente, para formar a matriz característica,  $\mathbf{E}_{\lambda k}$ , em que colunas correspondem a autovetores.

A transformação correspondente à PCA pode, então, ser escrita como:

$$\mathbf{T}_{\beta k} = \mathbf{C}_{cov} \cdot \mathbf{E}_{\lambda k} \quad (3.11)$$

Onde  $\mathbf{T}_{\beta k}$  é a matriz contendo os dados no novo sistema de coordenadas.

Os cubos de dados que são usados neste trabalho são compostos por imagens bidimensionais com espectros associados a cada *pixel*. Ao calcular a PCA deste tipo de cubos, obtém-se autovetores como função do comprimento de onda, energia ou frequência, que são também chamados de autoespectros.

Por outro lado,  $\mathbf{T}_{\beta k}$  representa dados em um novo sistema de coordenadas. Como os objetos nesse caso são pixels espaciais, a projeção deles em um dado autovetor pode ser representada como uma imagem espacial. Cada coluna de  $\mathbf{T}_{\beta k}$  pode ser agora transformada em uma imagem bidimensional,  $\mathbf{T}_{\beta k}$ . Estas imagens bidimensionais são chamadas tomogramas. A análise de tomogramas simultaneamente com autoespectros permite, por exemplo, identificar associações entre características espectrais e estruturas na imagem e vice-versa.



$x$ ,  $y$  e  $l$  e as coordenadas polares são  $R$  e  $\psi$ . Uma distância  $\varpi$  no plano da galáxia corresponde a uma distância projetada  $R$  no plano do céu.

No sistema de coordenadas da galáxia, o vetor unitário apontando para o observador é escrito como:

$$\hat{l} \equiv -\text{sen } \phi \text{ sen } i \hat{e}_\varpi - \text{cos } \phi \text{ sen } i \hat{e}_\phi + \text{cos } i \hat{e}_z \quad (3.12)$$

onde  $\hat{e}_\varpi$ ,  $\hat{e}_\phi$  e  $\hat{e}_z$  também são vetores unitários. Se escrevermos o vetor velocidade como:  $v = v_\varpi \hat{e}_\varpi + v_\phi \hat{e}_\phi + v_z \hat{e}_z$ , então a sua projeção na direção do observador ( $v_{los} = v \cdot \hat{l}$ ) é:

$$v_{los}(r) = -v_\varpi \text{sen } \phi \text{ sen } i - v_\phi \text{cos } \phi \text{ sen } i + v_z \text{cos } i. \quad (3.13)$$

Nesse caso, a inclinação do plano da galáxia em relação ao plano do céu é  $i$ . Para escrever  $\phi$  (ângulo na galáxia) em função de  $\psi$  (ângulo no céu), usamos as relações:

$$\varpi \text{cos } \phi = R \text{cos } \psi \quad e \quad \varpi \text{sen } \phi = R \frac{\text{sen } \psi}{\text{cos } i} \quad (3.14)$$

Usando as identidades trigonométricas, chegamos a:

$$\varpi = R \sqrt{\text{cos}^2 \psi + \text{sen}^2 \psi / \text{cos}^2 i} \quad (3.15)$$

Substituindo a equação 3.15 na equação 3.14 temos:

$$\text{cos } \phi = \frac{\text{cos } \psi}{\sqrt{\text{cos}^2 \psi + \text{sen}^2 \psi / \text{cos}^2 i}} \quad (3.16)$$

$$\text{sen } \phi = \frac{\text{sen } \psi / \text{cos } i}{\sqrt{\text{cos}^2 \psi + \text{sen}^2 \psi / \text{cos}^2 i}} \quad (3.17)$$

No caso em que a intersecção do plano da galáxia com o plano do céu não ocorre ao longo de um dos eixos de referência, basta substituir  $\psi$  por  $\psi - \psi_0$  na equações acima, sendo  $\psi_0$  o ângulo da linha dos nodos.

### 3.5.1 Recuperando $v_{\varpi}$

Para podermos obter a velocidade radial no plano da galáxia, precisamos primeiro fazer hipóteses sobre  $v_{\phi}$  e  $v_z$ , já que o problema é degenerado. A componente  $v_{\phi}$  pode ser eliminada subtraindo-se um modelo de rotação como aquele descrito na seção 3.3. Quanto a  $v_z$ , se assumirmos que o gás está contido no plano da galáxia temos que  $v_z \approx 0$ . Assim, temos que  $v_{los}(r) = -v_{\varpi} \sen \phi \sen i$ . Usando a equação 3.17, temos que:

$$v_{\varpi} = -v_{los} \frac{[\cos^2(\psi - \psi_0) + \sen^2(\psi - \psi_0)/\cos^2 i]^{\frac{1}{2}}}{\tan i \sen(\psi - \psi_0)} \quad (3.18)$$

Assim, podemos então calcular o fluxo líquido do gás através de anéis concêntricos. Detalhes sobre este cálculo estão presentes no capítulo 4.

# Capítulo 4

## Resultados

Os resultados estão descritos nos artigos científicos Gas Streaming Motions Towards the Nucleus of M 81 (Schnorr Müller et al. 2011), Gas Streaming Motions Towards the Nucleus of the Seyfert 2 Galaxy NGC 1667 (Schnorr-Müller et al. 2013), Feeding and Feedback in the Inner Kiloparcsec of the Active Galaxy NGC 2110 (Schnorr-Müller et al. 2013) e Gas Inflows Towards the Nucleus of the Active Galaxy NGC 7213 (Schnorr-Müller et al. 2013), disponíveis gratuitamente em <http://arxiv.org/archive/astro-ph>.

# Capítulo 5

## Conclusões e Perspectivas

### 5.1 Sumário

Nesta seção resumimos os principais resultados da análise das galáxias M 81, NGC 1667, NGC 2110 e NGC 7213, que são os seguintes:

1) M 81:

- O campo de velocidade estelar da galáxia mostra um padrão de rotação com o eixo maior orientado ao longo de um ângulo de posição de  $\approx 153^\circ$ , similar ao campo de velocidade estelar em larga escala (como reportado em trabalhos anteriores). Porém, nossa cobertura bidimensional permitiu a detecção de desvios de um padrão de pura rotação que podem ser atribuídos a movimentos estelares associados a uma barra nuclear;
- A dispersão de velocidade estelar do bojo é de  $162 \pm 15 \text{ km s}^{-1}$ , em boa concordância com resultados anteriores, resultando em uma estimativa da massa do buraco negro central de  $M_{BH} = 5,5_{-2,0}^{+3,6} \times 10^7 M_\odot$ ;

- O campo de velocidades do gás é completamente distinto do estelar e é dominado por *blueshifts* no lado distante da galáxia e *redshifts* no lado próximo. A subtração do campo de velocidade estelar confirma a presença de excessos de *blueshift* de  $\approx -100 \text{ km s}^{-1}$  no lado distante e alguns excessos de *redshift* tanto no lado distante quanto no lado próximo. Se o gás está contido no plano da galáxia, o resultado líquido desses excessos pode ser interpretado como influxo em direção ao centro da galáxia;
- A partir das velocidades medidas e da geometria assumida, estimamos uma taxa de influxo de massa de  $\phi \approx 4,0 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  dentro de um raio de  $\approx 60 \text{ pc}$ , um valor de aproximadamente sete vezes a taxa de acreção necessária para alimentar o núcleo ativo. Porém, esse é apenas o fluxo de massa de gás ionizado. Provavelmente o influxo total é maior, podendo ser dominado por gás neutro e molecular;
- Aplicamos a técnica de PCA ao nosso cubo de dados o que revelou características em pequena escala não vistas no campo de velocidade medido. As principais características são: (1) uma ejeção bipolar ou rotação não resolvida no núcleo; (2) um disco nuclear de gás em rotação dentro de um raio de  $\approx 50 \text{ pc}$  do núcleo; (3) uma ejeção bipolar compacta aproximadamente perpendicular ao disco;
- O campo de velocidade do gás sugere que o disco nuclear está sendo alimentado por gás em rotação no plano da galáxia;
- Um aumento na razão de linhas  $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$  ocorre aproximadamente na mesma localização e orientação que um jato rádio nuclear ( $\text{PA} \approx 50^\circ$ ), a qual é também aproximadamente a mesma orientação da ejeção bipolar detectada pela PCA.

O aumento na razão  $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$  é provavelmente resultado da interação do jato com o gás circumnuclear, já que essa razão é uma assinatura de choques.

2) NGC 1667:

- O campo de velocidades estelar apresenta um padrão de rotação consistente com rotação e um eixo maior cinemático orientado ao longo de  $\text{PA} \approx 165^\circ$ ;
- A dispersão de velocidade estelar do bojo é de  $118 \text{ km s}^{-1}$ , em boa concordância com resultados anteriores, resultando em uma estimativa da massa do buraco negro central de  $M_{BH} = 1.3_{-0.4}^{+0.5} \times 10^7 M_\odot$ ;
- O campo de rotação do gás é dominado por movimentos não circulares. A subtração de um modelo de rotação baseado na curva de rotação do gás em grande escala revela a presença de resíduos em dois braços espirais nos  $3''$  centrais, ambos traçados por estruturas de poeira;
- Considerando que resíduos em *blueshift* são observados no lado distante da galáxia e resíduos em *redshift* são observados no lado próximo, concluímos que estamos observando influxos de gás em direção ao centro da galáxia;
- Observamos um aumento da dispersão de velocidades em uma estrutura em forma de “S”, que se estende de  $2''$  SE até  $2''$  NE, uma região onde braços espirais nucleares também estão presentes. Choques nessa região podem levar o gás a perder momento angular e fluir em direção ao núcleo;
- Estimamos a taxa de influxo de matéria a partir de dois métodos diferentes. No primeiro, assumimos uma geometria para o influxo e obtivemos uma taxa de  $\approx 6 \times 10^{-2} M_\odot \text{ ano}^{-1}$  a uma distância de  $1''$  (296 pc) do núcleo. No segundo método, calculamos a taxa de influxo de massa através de anéis concêntricos e

obtivemos uma taxa máxima de  $\approx 2,8 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  a uma distância de 800 pc do núcleo, diminuindo para distâncias menores;

- As taxas de influxo de massa obtidas são maiores do que a taxa de acreção necessária ( $3,5 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ ) para alimentar o AGN. Considerando que as taxas de influxo obtidas através do segundo método para distâncias menores do que 800 pc caem com a diminuição da distância ao núcleo, estamos observando um acúmulo de gás nos 800 pc centrais da galáxia. O provável destino desse gás será a formação de estrelas.

### 3) NGC 2110

- Observações obtidas com a WFPC2 do telescópio espacial Hubble e mapas de fluxo das linhas [N II], [S II], [O I] e  $H\alpha$  obtidos por nós mostram uma estrutura espiral em forma de “S”, aproximadamente paralela e com forma similar ao jato rádio;
- A cinemática do gás é complexa e em grande parte do campo duas componentes são necessárias para se ajustar adequadamente as linhas de emissão. Identificamos quatro componentes distintas (de acordo com sua dispersão de velocidades): um disco morno, um disco frio, uma componente nuclear e uma nuvem de gás a altas latitudes ao norte;
- A dispersão de velocidades do disco morno varia entre  $100 \text{ km s}^{-1}$  e  $220 \text{ km s}^{-1}$ . Com exceção do  $1''$  central, o campo de velocidades apresenta um padrão consistente com rotação. No  $1''$  central, observamos ejeções de gás próximas ao eixo menor da galáxia, o que também é observado na componente nuclear. As razões de linha deste gás são características de AGN. Logo, concluímos que o gás no disco morno é ionizado pelo AGN;

- A dispersão de velocidades do disco frio é menor que a do disco morno, entre 60–90  $\text{km s}^{-1}$ . O gás no disco frio também alcança velocidades de rotação maiores que o gás no disco morno. Regiões H II são observadas nesta componente. A subtração de um modelo de rotação ajustado a esta componente revela resíduos em *blueshift* a NE (no lado distante da galáxia) e resíduos em *redshift* a SO (no lado próximo), ambos da ordem de  $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$ . Interpretamos esses resíduos como influxos de gás em direção ao núcleo da galáxia;
- A componente nuclear apresenta altas dispersões de velocidade, entre 220  $\text{km s}^{-1}$  e 600  $\text{km s}^{-1}$ , e não apresenta um padrão de rotação. Interpretamos esta componente como devida a uma ejeção de gás orientada ao longo da direção NE–SO, próxima ao eixo menor da galáxia, onde as maiores velocidades e dispersões de velocidade são observadas, e devida também a nuvens de gás ejetadas em diferentes direções;
- A nuvem ao norte possui uma dispersão de velocidades menor que o gás ao seu redor,  $60 \text{ km s}^{-1} \leq \sigma \leq 80 \text{ km s}^{-1}$ , e também apresenta uma velocidade de rotação igualmente menor. Emissões de raio-X e [O III] são observadas no mesmo local que a nuvem. Levando essas informações em consideração, interpretamos essa componente como uma nuvem de gás em altas latitudes, ionizada pelo AGN;
- Trabalhos anteriores sobre esta galáxia mostraram que a curva de rotação do gás era assimétrica. Nós mostramos que esta assimetria não é inerente ao campo de velocidades do gás; ela surge porque diferentes componentes cinemáticas dominam a emissão em gás ionizado em regiões distintas. Quando separamos a curva de rotação (e também o campo de velocidades) em diferentes componentes, verificamos que as curvas de rotação do gás morno e frio são simétricas;

- A partir das velocidades e fluxo do gás sendo ejetado e da geometria inferida, estimamos um limite superior para a taxa de ejeção de matéria de  $\dot{M}_{out} \approx 4,0 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  e um limite inferior de  $\dot{M}_{out} \approx 3,0 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ . Essa taxa de ejeção é três ordens de magnitude maior que a taxa de acreção ao núcleo ativo, o que implica que grande parte da massa sendo ejetada não se origina na vizinhança do núcleo ativo mas sim na região circumnuclear e é “carregada” por gás ejetado do núcleo ativo;
- A partir das medidas da velocidade, densidade e luminosidade e da geometria do gás fluindo em direção ao núcleo, estimamos uma taxa de influxo de gás ionizado de  $\phi \approx 2,2 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ , que é cerca de quatro vezes maior que a taxa de acreção ao núcleo ativo. Ou seja, mais gás está migrando para o centro da galáxia do que o necessário para alimentar o núcleo ativo. Este gás provavelmente será consumido na formação de novas estrelas e a presença de regiões H II no gás frio dá suporte a esse cenário.

#### 4) NGC 7213

- O campo de velocidades estelar apresenta dispersões de velocidade de até  $200 \text{ km s}^{-1}$  e um padrão de rotação com a linha dos nodos orientada ao longo de um ângulo de posição de  $\approx -4^{\circ}$  ( $\approx \text{N}$ ). Através da distribuição de poeira, concluímos que o lado próximo da galáxia é o oeste e o lado distante é o leste;
- A dispersão de velocidade estelar do bojo é de  $177 \text{ km s}^{-1}$ , resultando em uma estimativa da massa do buraco negro central de  $M_{BH} = 1_{-0.1}^{+0.2} \times 10^8 M_{\odot}$ ;
- O campo de velocidades do gás é completamente distinto do campo de velocidades estelar, sendo dominado por movimentos não-circulares. Velocidades de  $\approx 200 \text{ km s}^{-1}$  são observadas ao longo de dois braços espirais que se estendem

de  $\approx 4''$  (460 pc) NO e SE até o núcleo. Esses braços espirais vistos no campo de velocidade se correlacionam com braços espirais de poeira vistos no mapa de estrutura;

- *Redshifts* são observados no lado próximo da galáxia, enquanto *blueshifts* são observados no lado distante. Como as observações sugerem que o gás está contido no plano da galáxia, concluímos que o gás está fluindo em direção ao núcleo da galáxia;
- Um aumento na dispersão de velocidades que ocorre no mesmo local que braços espirais nucleares, interpretado como choques no gás, dá suporte a essa conclusão;
- Estimamos a taxa de influxo através de dois métodos diferentes. No primeiro, estimamos uma geometria para o fluxo ao longo dos braços espirais e obtivemos uma taxa de  $\approx 0,07 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  a uma distância de  $1''$  (115 pc) do núcleo. No segundo método, calculamos a taxa de influxo líquida através de uma série de anéis concêntricos e obtivemos uma taxa de influxo que varia de  $0,4 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  a 400 pc do núcleo até  $0,2 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  a 100 pc;
- Considerando que a taxa de influxo parece cair conforme a distância ao núcleo diminui e ainda a pequenas distâncias como 100 pc a taxa de influxo é muito maior que a taxa de acreção, concluímos que gás está sendo acumulado na região central desta galáxia. A partir das estimativas da taxa de influxo, obtém-se que  $10^6 M_{\odot}$  de gás ionizado se acumularão nos 300 pc centrais em  $10^7$  ano. No presente não há sinais de formação estelar na região nuclear, mas provavelmente no futuro próximo o gás acumulado iniciará esse processo, levando a um crescimento do bojo.

## 5.2 Conclusões

Encontramos que os campos de velocidade do gás das galáxias M 81, NGC 1667 e NGC 7213 são dominados por movimentos não circulares, enquanto o campo de velocidades estelar das mesmas é dominado por rotação. No caso das galáxias NGC 1667 e NGC 7213, observamos que os movimentos não circulares se concentram majoritariamente em braços espirais nucleares, associados a espirais de poeira vistas em mapas de estrutura destas galáxias. No caso da galáxia M 81, movimentos não circulares são observados majoritariamente em três regiões distintas no lado distante da galáxia. Observamos estruturas de poeira associadas a essas três regiões. No caso da galáxia NGC 2110, descobrimos que o gás ionizado emissor está contido em quatro componentes cinemáticas distintas, duas delas apresentam claramente um padrão de rotação, sendo uma delas um disco frio e a outra um disco morno. Ao contrário do campo de velocidade das outras três galáxias mencionadas, onde movimentos não circulares são dominantes, os campos de velocidade do disco morno e do disco frio são dominados por rotação, porém componentes adicionais estão presentes. Detectamos influxos de gás no disco frio, porém, como não foi possível detectar emissão do disco frio em grande parte do  $1''$  central, esses influxos acabaram sendo observados em apenas uma pequena região espacial, o que não nos permitiu associá-los a estruturas de poeira sem ambiguidades. Nas galáxias M 81, NGC 1667 e NGC 7213 observamos também aumentos na dispersão de velocidades que ocorrem no mesmo local em que influxos de gás são observados. Esse resultado está de acordo com um cenário em que choques levam o gás a perder momento angular e fluir em direção ao núcleo.

Outra característica comum às galáxias M 81, NGC 1667 e NGC 7213 é que as três apresentam sinais de interação. NGC 7213 é resultado de um *merger* e M 81 e NGC 1667 estão em interação com companheiras. NGC 2110, por outro lado,

não possui nenhuma companheira e seu campo de velocidades do gás não apresenta distorções que possam ser atribuídas a um *merger*. Entretanto, a observação de um disco de gás frio que parece ser rico em poeira (como indicado pelo mapa de estrutura) nos 5'' centrais sugere que NGC 2110 pode ter acretado uma galáxia anã rica em gás no passado, o que teria originado o disco de gás frio.

Em todas as galáxias de nossa amostra as taxas de influxo de gás ionizado são maiores do que a taxa de acreção ao AGN, de sete vezes maior no caso de M 81 a até aproximadamente mil vezes maior a uma distância de 800 pc do núcleo em NGC 1667. Isso sugere que estamos observando um acúmulo de gás na região central dessas galáxias: em um período de  $10^7$  anos,  $10^4 M_{\odot}$  terão se acumulado na região central de M 81 e  $10^7 M_{\odot}$  terão se acumulado nos 800 pc centrais de NGC 1667. Como esta estimativa leva em conta somente o gás ionizado, ela pode ser considerada um limite inferior para a massa acumulada na região central. Como mencionamos anteriormente, o provável destino desse gás será a formação de novas estrelas. Trabalhos recentes sugerem um cenário em que perturbações originadas pela interação levam grandes quantidades de gás à região central da galáxia, iniciando formação estelar e aumentando, se não iniciando, a atividade nuclear. Considerando que tanto NGC 1667 quanto NGC 7213 possuem anéis de formação estelar e nas quatro galáxias por nós observadas verificamos o acúmulo de gás na região central que provavelmente resultará em formação estelar no futuro, podemos afirmar que nossas observações estão de acordo com tal cenário.

### 5.3 Perspectivas para o futuro

Pretendemos estender as técnicas e procedimentos aplicados às quatro galáxias aqui discutidas às galáxias restantes da amostra, a fim de verificar a causa dos movimentos

não circulares no campo de velocidades do gás e sua relação com estruturas de poeira vistas em mapas de estrutura e verificar se as associações por nós relatadas aqui também são observadas em um número maior de objetos, com diferentes luminosidades e níveis de atividade nuclear. Pretendemos também verificar se outras galáxias da amostra também apresentam sinais de interação e, caso apresentem, investigaremos a existência de características comuns.

Temos também como perspectiva futura procurar influxos de gás na cinemática do gás molecular frio. Nosso grupo teve recentemente um pedido de tempo para o rádio telescópio Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array (ALMA) aceito. Cinco galáxias onde nosso grupo detectou influxos de gás serão observadas com o ALMA, revelando a cinemática e distribuição do gás molecular (particularmente CO). Compararemos as cinemáticas e distribuições do gás ionizado e molecular e também os influxos de gás. Além disso, a resolução espacial do ALMA nos permitirá observar os influxos de gás em escalas menores do que as observadas com o telescópio GEMINI.

# Bibliografia

- [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] ALLER, M. C.; RICHSTONE, D. O. Host Galaxy Bulge Predictors of Supermassive Black Hole Mass. **Astrophysical Journal**, v. 665, p. 120–156, August 2007.
- [4] 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.
- [5] ANTONUCCI, R. R. J.; MILLER, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 297, p. 621–632, October 1985.
- [6] ARMUS, L.; HECKMAN, T. M.; MILEY, G. K. The optical emission-line nebulae of powerful far-infrared galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 364, p. 471–495, December 1990.
- [7] BARBOSA, F. K. B.; STORCHI-BERGMANN, T.; CID FERNANDES, R.; WINGE, C.; SCHMITT, H. Gemini/GMOS Integral Field Unit stellar kinematics of the nuclear region of six nearby active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 371, p. 170–184, September 2006.
- [8] BARVAINIS, R. Hot dust and the near-infrared bump in the continuum spectra of quasars and active galactic nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 320, p. 537–544, September 1987.

- [9] BERTOLA, F.; BETTONI, D.; DANZIGER, J.; SADLER, E.; SPARKE, L.; DE ZEEUW, T. Testing the gravitational field in elliptical galaxies - NGC 5077. **Astrophysical Journal**, v. 373, p. 369–390, June 1991.
- [10] BIETENHOLZ, M. F.; BARTEL, N.; RUPEN, M. P. A Stationary Core with a One-sided Jet in the Center of M81. **Astrophysical Journal**, v. 532, p. 895–908, April 2000.
- [11] BINNEY, J.; TREMAINE, T. **Galactic Dynamics**: Princeton Series in Astrophysics, Princeton Univ. Press, New Jersey, 1988.
- [12] BOWER, G. A.; WILSON, A. S.; HECKMAN, T. M.; RICHSTONE, D. O. Double-Peaked Broad Emission Lines in the Nucleus of M81. **Astronomical Journal**, v. 111, p. 1901, May 1996.
- [13] BRADT, H. V.; BURKE, B. F.; CANIZARES, C. R.; GREENFIELD, P. E.; KELLEY, R. L.; MCCLINTOCK, J. E.; VAN PARADIJS, J.; KOSKI, A. T. NGC 2110 - an X-ray/radio galaxy with elliptical morphology. **Astrophysical Journal Letters**, v. 226, p. L111–L114, December 1978.
- [14] BUTA, R.; PURCELL, G. B. NGC 3081 - Surface photometry and kinematics of a classic resonance ring barred galaxy. **Astronomical Journal**, v. 115, p. 484, February 1998.
- [15] BUTA, R. J.; BYRD, G. G.; FREEMAN, T. A Hubble Space Telescope Study of Star Formation in the Inner Resonance Ring of NGC 3081. **Astronomical Journal**, v. 127, p. 1982–2001, April 2004.
- [16] BYRD, G. G.; FREEMAN, T.; BUTA, R. J. The Inner Resonance Ring of NGC 3081. II. Star Formation, Bar Strength, Disk Surface Mass Density, and Mass-to-Light Ratio. **Astronomical Journal**, v. 131, p. 1377–1393, March 2006.
- [17] 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.
- [18] COMBES, F. AGN Fueling: The observational point of view. In: **ACTIVE GALACTIC NUCLEI: FROM CENTRAL ENGINE TO HOST GALAXY**,

S. Collin, F. Combes, & I. Shlosman, , editor, v. 290 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 411, 2003.

- [19] COTINI, S.; RIPAMONTI, E.; CACCIANIGA, A.; COLPI, M.; DELLA CECA, R.; MAPELLI, M.; SEVERGNINI, P.; SEGRETO, A. The merger fraction of active and inactive galaxies in the local Universe through an improved non-parametric classification. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 431, p. 2661–2672, May 2013.
- [20] CROTON, D. J.; SPRINGEL, V.; WHITE, S. D. M.; DE LUCIA, G.; FRENK, C. S.; GAO, L.; JENKINS, A.; KAUFFMANN, G.; NAVARRO, J. F.; YOSHIDA, N. The many lives of active galactic nuclei: cooling flows, black holes and the luminosities and colours of galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 365, p. 11–28, January 2006.
- [21] DAVIES, R. I.; MACIEJEWSKI, W.; HICKS, E. K. S.; TACCONI, L. J.; GENZEL, R.; ENGEL, H. Stellar and Molecular Gas Kinematics Of NGC 1097: Inflow Driven by a Nuclear Spiral. **Astrophysical Journal**, v. 702, p. 114–128, September 2009.
- [22] DEO, R. P.; RICHARDS, G. T.; NIKUTTA, R.; ELITZUR, M.; GALLAGHER, S. C.; IVEZIĆ, Ž.; HINES, D. Dusty Tori of Luminous Type 1 Quasars at  $z \sim 2$ . **Astrophysical Journal**, v. 729, p. 108, March 2011.
- [23] DEVEREUX, N.; FORD, H.; JACOBY, G. Hubble Space Telescope Imaging of the Central 1 Kiloparsec of M81. **Astrophysical Journal**, v. 481, p. L71, June 1997.
- [24] DI MATTEO, T.; SPRINGEL, V.; HERNQUIST, L. Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. **Nature**, v. 433, p. 604–607, February 2005.
- [25] ELITZUR, M.; SHLOSAN, I. The AGN-obscuring Torus: The End of the “Doughnut” Paradigm? **Astrophysical Journal Letters**, v. 648, p. L101–L104, September 2006.
- [26] ELVIS, M. Slicing the Torus: Obscuring Structures in Quasars. **Journal of Physics Conference Series**, v. 372, n. 1, p. 012032, July 2012.

- [27] EMSELLEM, E.; FATHI, K.; WOZNIAK, H.; FERRUIT, P.; MUNDELL, C. G.; SCHINNERER, E. Gas and stellar dynamics in NGC 1068: probing the galactic gravitational potential. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 365, p. 367–384, January 2006.
- [28] EMSELLEM, E.; GOUDFROOIJ, P.; FERRUIT, P. A two-arm gaseous spiral in the inner 200 pc of the early-type galaxy NGC 2974: signature of an inner bar. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 345, p. 1297–1312, November 2003.
- [29] ENGLMAIER, P.; SHLOSMAN, I. Dynamical Decoupling of Nested Bars: Self-gravitating Gaseous Nuclear Bars. **Astrophysical Journal Letters**, v. 617, p. L115–L118, December 2004.
- [30] ERWIN, P.; BELTRÁN, J. C. V.; GRAHAM, A. W.; BECKMAN, J. E. When Is a Bulge Not a Bulge? Inner Disks Masquerading as Bulges in NGC 2787 and NGC 3945. **Astrophysical Journal**, v. 597, p. 929–947, November 2003.
- [31] ERWIN, P.; SPARKE, L. S. A WIYN Survey of Early-Type Barred Galaxies: Double Bars and Central Structures. In: GALAXY DYNAMICS - A RUTGERS SYMPOSIUM, Merritt, D. R.; Valluri, M.; Sellwood, J. A., editores, v. 182 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 243, August 1999.
- [32] ERWIN, P.; SPARKE, L. S. Double Bars, Inner Disks, and Nuclear Rings in Early-Type Disk Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 124, p. 65–77, July 2002.
- [33] ERWIN, P.; SPARKE, L. S. An Imaging Survey of Early-Type Barred Galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 146, p. 299–352, June 2003.
- [34] EVANS, D. A.; LEE, J. C.; KAMENETSKA, M.; GALLAGHER, S. C.; KRAFT, R. P.; HARDCASTLE, M. J.; WEAVER, K. A. The Chandra, Hubble Space Telescope, and VLA View of the Circumnuclear Extended Emission in the Narrow Emission Line Galaxy NGC 2110. **Astrophysical Journal**, v. 653, p. 1121–1128, December 2006.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] FERRUIT, P.; MUNDELL, C. G.; NAGAR, N. M.; EMSELLEM, E.; PÉCONTAL, E.; WILSON, A. S.; SCHINNERER, E. Ionized gas and stars in the central kiloparsec of the type 2 Seyfert galaxy NGC 2110 - I. The data. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 352, p. 1180–1198, August 2004.
- [38] FILIPPENKO, A. V.; HALPERN, J. P. NGC 7213 - A key to the nature of liners? **Astrophysical Journal**, v. 285, p. 458–474, October 1984.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] GONZÁLEZ DELGADO, R. M.; ARRIBAS, S.; PÉREZ, E.; HECKMAN, T. Is a Minor Merger Driving the Nuclear Activity in the Seyfert 2 Galaxy NGC 2110? **Astrophysical Journal**, v. 579, p. 188–204, November 2002.
- [42] GONZALEZ DELGADO, R. M.; PEREZ, E. H II Region Population in a Sample of Nearby Galaxies with Nuclear Activity. II. Luminosity Function, Size, and Radial Distributions. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 108, p. 199–+, January 1997.

- [43] GRANATO, G. L.; DE ZOTTI, G.; SILVA, L.; BRESSAN, A.; DANESE, L. A Physical Model for the Coevolution of QSOs and Their Spheroidal Hosts. **Astrophysical Journal**, v. 600, p. 580–594, January 2004.
- [44] 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.
- [45] HO, L. C. The Spectral Energy Distributions of Low-Luminosity Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 516, p. 672–682, May 1999.
- [46] 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.
- [47] HOPKINS, P. F.; HAYWARD, C. C.; NARAYANAN, D.; HERNQUIST, L. The Origins of AGN Obscuration: The ‘Torus’ as a Dynamical, Unstable Driver of Accretion. **ArXiv e-prints**, August 2011.
- [48] HOPKINS, P. F.; HERNQUIST, L.; COX, T. J.; DI MATTEO, T.; MARTINI, P.; ROBERTSON, B.; SPRINGEL, V. Black Holes in Galaxy Mergers: Evolution of Quasars. **Astrophysical Journal**, v. 630, p. 705–715, September 2005.
- [49] HOPKINS, P. F.; HERNQUIST, L.; COX, T. J.; ROBERTSON, B.; KRAUSE, E. An Observed Fundamental Plane Relation for Supermassive Black Holes. **Astrophysical Journal**, v. 669, p. 67–73, November 2007.
- [50] HOPKINS, P. F.; HICKOX, R.; QUATAERT, E.; HERNQUIST, L. Are most low-luminosity active galactic nuclei really obscured? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 398, p. 333–349, September 2009.
- [51] HUNT, L. K.; MALKAN, M. A. Circumnuclear Structure and Black Hole Fueling: Hubble Space Telescope NICMOS Imaging of 250 Active and Normal Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 616, p. 707–729, December 2004.
- [52] IYOMOTO, N.; MAKISHIMA, K. Long-term variability of the low-luminosity active galactic nucleus of M81. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 321, p. 767–775, March 2001.

- [53] KISHIMOTO, M.; HÖNIG, S. F.; BECKERT, T.; WEIGELT, G. The innermost region of AGN tori: implications from the HST/NICMOS type 1 point sources and near-IR reverberation. **Astronomy and Astrophysics**, v. 476, p. 713–721, December 2007.
- [54] KNAPEN, J. H. Gravitationally Induced Inflow in Starbursts and Agn. **Astrophysics and Space Science**, v. 295, p. 85–94, January 2005.
- [55] KORMENDY, J.; BENDER, R.; CORNELL, M. E. Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges. **Nature**, v. 469, p. 374–376, January 2011.
- [56] KORMENDY, J.; HO, L. C. Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies. **ArXiv e-prints**, April 2013.
- [57] KORMENDY, J.; KENNICUTT, R. C., JR. Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 42, p. 603–683, September 2004.
- [58] LAINE, S.; VAN DER MAREL, R. P.; ROSSA, J.; HIBBARD, J. E.; MIHOS, J. C.; BÖKER, T.; ZABLUDOFF, A. I. A Hubble Space Telescope WFPC2 Investigation of the Nuclear Morphology in the Toomre Sequence of Merging Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 126, p. 2717–2739, December 2003.
- [59] MAGORRIAN, J.; TREMAINE, S.; RICHSTONE, D.; BENDER, R.; BOWER, G.; DRESSLER, A.; FABER, S. M.; GEBHARDT, K.; GREEN, R.; GRILLMAIR, C.; KORMENDY, J.; LAUER, T. The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers. **Astronomical Journal**, v. 115, p. 2285–2305, June 1998.
- [60] MALKAN, M. A. Near-ultraviolet spectroscopy of Seyfert nuclei - Reddening and Bowen fluorescence. **Astrophysical Journal**, v. 310, p. 679–688, November 1986.
- [61] 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.
- [62] MARKOFF, S.; NOWAK, M.; YOUNG, A.; MARSHALL, H. L.; CANIZARES, C. R.; PECK, A.; KRIPS, M.; PETITPAS, G.; SCHÖDEL, R.; BOWER, G. C.;

- CHANDRA, P.; RAY, A.; MUNO, M.; GALLAGHER, S.; HORNSTEIN, S.; CHEUNG, C. C. Results from an Extensive Simultaneous Broadband Campaign on the Underluminous Active Nucleus M81\*: Further Evidence for Mass-scaling Accretion in Black Holes. **Astrophysical Journal**, v. 681, p. 905–924, July 2008.
- [63] MARTINI, P.; DICKEN, D.; STORCHI-BERGMANN, T. The Origin of Dust in Early-type Galaxies and Implications for Accretion onto Supermassive Black Holes. **Astrophysical Journal**, v. 766, p. 121, April 2013.
- [64] MARTINI, P.; REGAN, M. W.; MULCHAEY, J. S.; POGGE, R. W. Circumnuclear Dust in Nearby Active and Inactive Galaxies. II. Bars, Nuclear Spirals, and the Fueling of Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 589, p. 774–782, June 2003.
- [65] MOR, R.; NETZER, H.; ELITZUR, M. Dusty Structure Around Type-I Active Galactic Nuclei: Clumpy Torus Narrow-line Region and Near-nucleus Hot Dust. **Astrophysical Journal**, v. 705, p. 298–313, November 2009.
- [66] MORAN, E. C.; BARTH, A. J.; ERACLEOUS, M.; KAY, L. E. Transient and Highly Polarized Double-Peaked H $\alpha$  Emission in the Seyfert 2 Nucleus of NGC 2110. **Astrophysical Journal Letters**, v. 668, p. L31–L34, October 2007.
- [67] MORAN, E. C.; BARTH, A. J.; KAY, L. E.; FILIPPENKO, A. V. The Frequency of Polarized Broad Emission Lines in Type 2 Seyfert Galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 540, p. L73–L77, September 2000.
- [68] MULCHAEY, J. S.; REGAN, M. W. The Fueling of Nuclear Activity: The Bar Properties of Seyfert and Normal Galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 482, p. L135, June 1997.
- [69] MULCHAEY, J. S.; WILSON, A. S.; TSVETANOV, Z. An Emission-Line Imaging Survey of Early-Type Seyfert Galaxies. I. The Observations. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 102, p. 309, February 1996.
- [70] MÜLLER SÁNCHEZ, F.; 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.

- [71] MÜLLER-SÁNCHEZ, F.; PRIETO, M. A.; MEZCUA, M.; DAVIES, R. I.; MALKAN, M. A.; ELITZUR, M. The Central Molecular Gas Structure in LINERs with Low-luminosity Active Galactic Nuclei: Evidence for Gradual Disappearance of the Torus. **Astrophysical Journal Letters**, v. 763, p. L1, January 2013.
- [72] 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.
- [73] MURRAY, N.; QUATAERT, E.; THOMPSON, T. A. On the Maximum Luminosity of Galaxies and Their Central Black Holes: Feedback from Momentum-driven Winds. **Astrophysical Journal**, v. 618, p. 569–585, January 2005.
- [74] NAGAO, T.; KAWABATA, K. S.; MURAYAMA, T.; OHYAMA, Y.; TANIGUCHI, Y.; SHIOYA, Y.; SUMIYA, R.; SASAKI, S. S. Subaru Spectropolarimetry of Markarian 573: The Hidden High-Ionization Nuclear Emission-Line Region inside the Dusty Torus. **Astronomical Journal**, v. 128, p. 2066–2072, November 2004.
- [75] NAGAR, N. M.; WILSON, A. S.; MULCHAEY, J. S.; GALLIMORE, J. F. Radio Structures of Seyfert Galaxies. VIII. A Distance- and Magnitude-Limited Sample of Early-Type Galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 120, p. 209–245, February 1999.
- [76] NENKOVA, M.; SIROCKY, M. M.; IVEZIĆ, Ž.; ELITZUR, M. AGN Dusty Tori. I. Handling of Clumpy Media. **Astrophysical Journal**, v. 685, p. 147–159, September 2008.
- [77] PASTORIZA, M.; GEROLA, H. Spectral Variation in the Seyfert Galaxy NGC 1566. **Astrophysical Letters**, v. 6, p. 155–+, July 1970.
- [78] PEIMBERT, M.; TORRES-PEIMBERT, S. Physical conditions in the nucleus of M81. **Astrophysical Journal**, v. 245, p. 845–856, May 1981.
- [79] PETERSON, B. M. **An Introduction to Active Galactic Nuclei**: Cambridge University Press, 1997.

- [80] PINER, B. G.; STONE, J. M.; TEUBEN, P. J. Nuclear Rings and Mass Inflow in Hydrodynamic Simulations of Barred Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 449, p. 508, August 1995.
- [81] POGGE, R. W.; MARTINI, P. Hubble Space Telescope Imaging of the Circumnuclear Environments of the CfA Seyfert Galaxies: Nuclear Spirals and Fueling. **Astrophysical Journal**, v. 569, p. 624–640, April 2002.
- [82] RADOVICH, M.; RAFANELLI, P. Spectroscopy of circumnuclear and extranuclear emission line regions in Seyfert galaxies. I. NGC 1667. **Astronomy and Astrophysics**, v. 306, p. 97–+, February 1996.
- [83] REGAN, M. W.; TEUBEN, P. The Formation of Nuclear Rings in Barred Spiral Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 582, p. 723–742, January 2003.
- [84] RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T. Compact molecular disc and ionized gas outflows within 350 pc of the active nucleus of Mrk 1066. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 411, p. 469–486, February 2011.
- [85] RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; MCGREGOR, P. J. The Dusty Nuclear Torus in NGC 4151: Constraints from Gemini Near-Infrared Integral Field Spectrograph Observations. **Astrophysical Journal**, v. 698, p. 1767–1770, June 2009.
- [86] RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; WINGE, C. Feeding versus feedback in AGNs from near-infrared IFU observations: the case of Mrk 79. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 430, p. 2249–2261, April 2013.
- [87] 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**, 2008.
- [88] ROSARIO, D. J.; SANTINI, P.; LUTZ, D.; NETZER, H.; BAUER, F. E.; BERTA, S.; MAGNELLI, B.; POPESSO, P.; ALEXANDER, D.; BRANDT, W. N.; GENZEL, R.; MAIOLINO, R.; MULLANEY, J. R.; NORDON, R.;

- SAINTONGE, A.; TACCONI, L.; WUYTS, S. Nuclear Activity is more prevalent in Star-Forming Galaxies. **ArXiv e-prints**, February 2013.
- [89] SARZI, M.; RIX, H.-W.; SHIELDS, J. C.; RUDNICK, G.; HO, L. C.; MCINTOSH, D. H.; FILIPPENKO, A. V.; SARGENT, W. L. W. Supermassive Black Holes in Bulges. **Astrophysical Journal**, v. 550, p. 65–74, March 2001.
- [90] SCANNAPIECO, E.; OH, S. P. Quasar Feedback: The Missing Link in Structure Formation. **Astrophysical Journal**, v. 608, p. 62–79, June 2004.
- [91] SCHMITT, H. R. The Frequency of Active and Quiescent Galaxies with Companions: Implications for the Feeding of the Nucleus. **Astrophysical Journal**, v. 122, p. 2243–2256, November 2001.
- [92] 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.
- [93] SEYFERT, C. K. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 97, p. 28, January 1943.
- [94] SHLOSMA, I.; BEGELMAN, M. C.; FRANK, J. The fuelling of active galactic nuclei. **Nature**, v. 345, p. 679–686, June 1990.
- [95] SILK, J.; REES, M. J. Quasars and galaxy formation. **Astronomy and Astrophysics**, v. 331, p. L1–L4, March 1998.
- [96] 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.
- [97] STEINER, J. E.; MENEZES, R. B.; RICCI, T. V.; OLIVEIRA, A. S. PCA Tomography: how to extract information from data cubes. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 395, p. 64–75, May 2009.
- [98] 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.

- [99] TRAN, H. D. Hidden Double-peaked Emitters in Seyfert 2 Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 711, p. 1174–1184, March 2010.
- [100] ULVESTAD, J. S.; WILSON, A. S. The nuclear radio source of the X-ray Galaxy NGC 2110. **Astrophysical Journal Letters**, v. 264, p. L7–L11, January 1983.
- [101] 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.
- [102] 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.
- [103] WADA, K. Fueling Gas to the Central Region of Galaxies. **Coevolution of Black Holes and Galaxies**, p. 186, 2004.
- [104] ZIER, C.; BIERMANN, P. L. Binary black holes and tori in AGN. II. Can stellar winds constitute a dusty torus? **Astronomy and Astrophysics**, v. 396, p. 91–108, December 2002.