

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

O ambiente circum-nuclear em galáxias  
ativas: formação estelar,  
toro de poeira e cinemática do gás <sup>1</sup>

The circum-nuclear environmnet in active galaxies:  
star formation, dusty torus and gas kinematics

Daniel Ruschel Dutra

Tese realizada sob a orientação da Professora Dra. Miriani Pastoriza e coorientação do Professor Dr. Rogério Riffel, apresentado 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, 9 de Julho de 2015

---

<sup>1</sup>Trabalho Financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Comissão para o Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES).



# *Agradecimentos*

À minha orientadora, Miriani Pastoriza, pela sua contribuição de valor inestimável a minha formação acadêmica e profissional, por seu empenho, comprometimento e companheirismo. Agradeço pelo seu incentivo e apoio quando quis buscar novos horizontes. Também agradeço por todas as críticas, que sempre me levaram a auto-superação e a exigir mais de mim mesmo.

Ao meu co-orientador, Rogério Riffel, por sua dedicação, compreensão e confiança. Agradeço também pelas diversas oportunidades de expandir a minha atuação profissional.

A José Miguel Rodriguez Espinosa e Omaira González Martín, que assumiram o papel de co-orientadores durante minha estada de um ano no Instituto de Astrofísica de Canarias. Agradeço pela acolhida, pela dedicação e pela diversificação de perspectivas que me propiciaram.

A Dinalva Sales pelas importantes contribuições, e por compartilhar os dados do T-ReCS, que constituem parte fundamental da primeira seção deste trabalho.

A José Andrés Hernández Jiménez, por suas diversas contribuições, em especial na última seção desta tese, e por compartilhar os dados analisados nesta seção.

Aos colegas e amigos do Departamento de Astronomia pelo apoio mútuo durante nossa formação.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Astrofísica de Canarias pelos meios para a execução deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa Ciência sem Fronteiras, pelo suporte financeiro.



# *Sumário*

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	p. 14
1.1	Núcleos Galácticos Ativos . . . . .	p. 14
1.2	Propriedades e modelagem do toro . . . . .	p. 15
1.3	Coevolução entre o AGN e a galáxia hospedeira . . . . .	p. 17
1.4	Feições espectrais no infravermelho médio: uma maneira de acessar a formação estelar . . . . .	p. 19
1.5	Motivação . . . . .	p. 21
<b>2</b>	<b>Observações</b>	p. 22
2.1	Dados do telescópio Spitzer . . . . .	p. 22
2.1.1	Espectros em modo de mapeamento . . . . .	p. 24
2.2	Espectros do T-ReCS . . . . .	p. 26
2.3	Imagens no MIR em alta resolução . . . . .	p. 29
2.3.1	Imagens da CanariCam . . . . .	p. 30
2.3.2	Imagens do VISIR . . . . .	p. 33
2.4	Espectroscopia de campo integral com o GMOS . . . . .	p. 34
2.4.1	Redução . . . . .	p. 37
<b>3</b>	<b>Propriedades do toro de poeira em três AGNs</b>	p. 40
3.1	Características espectrais de NGC 1386 e NGC 7213 . . . . .	p. 41
3.2	Espectro nuclear: evidências de um toro de poeira? . . . . .	p. 44

3.3	Extensão para a galáxia Mrk 3 . . . . .	p. 49
3.4	Discussão . . . . .	p. 53
<b>4</b>	<b>Formação estelar através da emissão no MIR</b>	<b>p. 56</b>
4.1	Amostra . . . . .	p. 56
4.2	Formação estelar em escalas de <i>kpc</i> . . . . .	p. 57
4.2.1	Fotometria no filtro de $8\mu\text{m}$ : NGC 1386 e NGC 7213 . . . . .	p. 57
4.2.2	Fluxos e larguras equivalentes da galáxia hospedeira . . . . .	p. 58
4.2.3	Taxas de formação estelar a partir de dois indicadores independentes	p. 60
4.3	PAH $11.3\mu\text{m}$ em alta resolução . . . . .	p. 63
4.3.1	Fotometria . . . . .	p. 65
4.3.2	Derivação do fluxo na banda de PAH . . . . .	p. 66
4.3.3	Taxa de formação estelar a partir do PAH em $11.3\mu\text{m}$ . . . . .	p. 70
4.3.4	Implicações e comparação com modelos teóricos . . . . .	p. 71
<b>5</b>	<b>Estudo da cinemática do gás ionizado da galáxia AM2306-721A</b>	<b>p. 75</b>
5.1	Ajuste da curva de luz . . . . .	p. 76
5.2	Amostragem espacial adaptativa . . . . .	p. 78
5.3	Ajuste das linhas de emissão . . . . .	p. 79
5.4	Análise da cinemática do gás ionizado . . . . .	p. 82
5.4.1	Ajuste da curva de rotação ao cubo de dados . . . . .	p. 82
5.4.2	Comparação com a rotação em grande escala . . . . .	p. 85
<b>6</b>	<b>Sumário e conclusões</b>	<b>p. 91</b>
<b>7</b>	<b>Perspectivas</b>	<b>p. 95</b>
	<b>Apêndice A – Artigos publicados</b>	<b>p. 96</b>
	<b>Apêndice B – Artigos submetidos</b>	<b>p. 106</b>



# *Lista de Figuras*

1.1	Diagrama do modelo unificado para AGNs . . . . .	p. 15
1.2	Bandas espectrais de PAH . . . . .	p. 20
2.1	Curvas de transmissão dos filtros da câmara IRAC . . . . .	p. 24
2.2	Subtração da componente estelar da imagem em $8\mu\text{m}$ : NGC 1386 . . . . .	p. 24
2.3	Subtração da componente estelar da imagem em $8\mu\text{m}$ : NGC 1386 . . . . .	p. 25
2.4	Espectros IRS . . . . .	p. 26
2.5	Perfis espaciais dos espectros do T-ReCS . . . . .	p. 28
2.6	Curvas de transmissão dos filtros da CanariCam e do VISIR. . . . .	p. 31
2.7	Discrepâncias na posição central da CanariCam . . . . .	p. 31
2.8	Imagens reduzidas da CanariCam . . . . .	p. 33
2.9	Imagens do VISIR no filtro PAH2 . . . . .	p. 35
2.10	Imagens do VISIR no filtro PAH2_2 . . . . .	p. 36
2.11	Justaposição dos espectros do GMOS . . . . .	p. 37
2.12	Razão sinal-ruído para os espectros em IFS . . . . .	p. 38
2.13	Espectro central da galáxia AM2306-721A . . . . .	p. 39
2.14	Densidades de fluxo do contínuo e da linha $H\alpha$ para a região central de AM2306-721A . . . . .	p. 39
3.1	Espectros nuclear do T-ReCS para NGC 1386 . . . . .	p. 42
3.2	Espectro nuclear do T-ReCS para NGC 7213 . . . . .	p. 43
3.3	Espectros nucleares de NGC 1386 e NGC 7213 . . . . .	p. 44
3.4	Histograma da probabilidade a posteriori para NGC 1386 . . . . .	p. 45
3.5	Histograma da probabilidade a posteriori para NGC 7213 . . . . .	p. 46



3.6	Ajuste dos modelos de toro a NGC 1386 . . . . .	p. 47
3.7	Ajuste dos modelos de toro a NGC 7213 . . . . .	p. 48
3.8	Mapas da probabilidade a posteriori para cada par de parâmetros dos modelos CLUMPY, para a galáxia NGC 1386. A escala de tons de cinza representa a probabilidade de cada combinação, com os tons mais escuros indicando maior probabilidade. As curvas azul e vermelha indicam os níveis de $1\sigma$ e $2\sigma$ respectivamente. . . . .	p. 49
3.9	Mapas da probabilidade a posteriori para cada par de parâmetros dos modelos CLUMPY, para a galáxia NGC 7213. A escala de tons de cinza representa a probabilidade de cada combinação, com os tons mais escuros indicando maior probabilidade. As curvas azul e vermelha indicam os níveis de $1\sigma$ e $2\sigma$ respectivamente. . . . .	p. 50
3.10	Espectro nuclear da galáxia Mrk 3. . . . .	p. 51
3.11	Histograma a posteriori para Mrk3 com $i$ livre . . . . .	p. 52
3.12	Histograma a posteriori para Mrk3 com $i < 45^\circ$ . . . . .	p. 53
3.13	Ajuste de toro para Mrk 3 . . . . .	p. 54
3.14	Representação dos modelos de toro para as galáxias NGC 1386, NGC 7213 e Mrk 3 . . . . .	p. 54
4.1	Imagens IRAC no filtro $8\mu\text{m}$ . . . . .	p. 58
4.2	Imagem óptica com contornos em $8\mu\text{m}$ . . . . .	p. 59
4.3	Correlação entre $L_{[\text{NeII}]}$ e $L_{\text{Br}\alpha}$ . . . . .	p. 61
4.4	Comparação entre as duas estimativas para $\Sigma_{\text{SFR}}$ . . . . .	p. 62
4.5	Mapas de emissão de PAH para fontes estendidas . . . . .	p. 64
4.6	Mapas de emissão de PAH para fontes estendidas . . . . .	p. 65
4.7	Comparação entre pontos fotométricos nucleares e espectros do Spitzer . . . . .	p. 67
4.8	Exemplo de espectro teórico utilizado para estimar o fluxo de PAH . . . . .	p. 68
4.9	Efeitos de <i>redshift</i> e fluxo de PAH sobre a diferença entre os fluxos fotométricos . . . . .	p. 70
4.10	Relação entre a luminosidade do AGN e a taxa de formação estelar . . . . .	p. 72

5.1	Imagem do par AM2306-721A no filtro $r$ . . . . .	p. 75
5.2	Imagem de aquisição sobre a qual foi feito o ajuste do perfil de brilho . . .	p. 77
5.3	Ajuste do perfil de brilho da galáxia AM2306-721A . . . . .	p. 78
5.4	Níveis de tesselação de Voronoi . . . . .	p. 79
5.5	Exemplo de ajuste das linhas próximas a $H\alpha$ . . . . .	p. 80
5.6	Mapa de velocidades para a região central de AM2306-721A . . . . .	p. 81
5.7	Ilustração da interpretação tridimensional do campo de velocidades para AM2306-721A. . . . .	p. 82
5.8	Densidade de fluxo da linha $H\alpha$ e mapa da razão de fluxo $[NII/H\alpha]$ . . .	p. 82
5.9	Diagramas de diagnóstico de razões de linhas iônicas para a região central de AM2306-721A . . . . .	p. 83
5.10	Diferença entre o valor no ponto médio geométrico de cada domínio e a média sobre todos os seus <i>spaxels</i> , na avaliação da equação 5.2. . . . .	p. 84
5.11	Curva de rotação para a IFS da galáxia AM2306-721A . . . . .	p. 85
5.12	Modelo de rotação para AM2306-721A baseado nos espectros de fenda longa . . . . .	p. 86
5.13	Modelos baseado nos dados de fenda longa aplicado ao campo da espec- troscopia de campo integral. . . . .	p. 88
5.14	Largura equivalente de $H\alpha$ . . . . .	p. 89

# *Lista de Tabelas*

2.1	Objetivos científicos e fontes de dados . . . . .	p. 23
2.2	Registro de observações com o T-RecS . . . . .	p. 26
2.3	Registro de observações com o VISIR . . . . .	p. 29
2.4	Registro de observações com a CanariCam. . . . .	p. 30
3.1	Parâmetros do melhor ajuste dos modelos CLUMPY. . . . .	p. 46
3.2	Parâmetros do ajuste de toro para Mrk 3 . . . . .	p. 52
4.1	Luminosidades medidas nos espectros e imagens do Spitzer . . . . .	p. 58
4.2	EW de feições selecionadas no espectro do IRS em unidades de $\mu\text{m}$ . . . . .	p. 59
4.3	Densidade superficial de SFR . . . . .	p. 62
4.4	Fluxos fotométricos . . . . .	p. 66
5.1	Funções analíticas para o perfil de brilho de AM2306-721A . . . . .	p. 77
5.2	Parâmetros do ajuste do modelo de Bertola . . . . .	p. 87

# Resumo

O paradigma atual para as galáxias de núcleo ativo sustenta que a emissão nuclear provém da acreção de matéria a um buraco negro super massivo (SMBH), envolto em uma distribuição toroidal de nuvens de alta profundidade óptica. É crescente a percepção de que a evolução do SMBH deve estar ligada a evolução da galáxia que o hospeda, porém os mecanismos que geram as correlações que vemos hoje entre propriedades do bojo galático e o SMBH ainda não são completamente compreendidos. A formação estelar circum-nuclear é um dos fenômenos que poderia constituir o elo de ligação para a coevolução entre galáxia e SMBH. Começamos este trabalho discutindo as propriedades do toroide de poeira, conhecidos através de seu espectro na região do infravermelho médio. Demonstramos, através do ajuste dos modelos de transmissão radiativa CLUMPY, que os toroides das galáxias Sy2 *Compton-thick* NGC 1386 e Mrk 3 são intrinsecamente diferentes do toroide da Sy1 NGC 7213. Com base nos mesmos modelos calculamos densidades de coluna para NGC 1386 e Mrk 3, e encontramos valores de  $N_{\text{H}} = 2.0^{+1.2}_{-1.6} \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ , e  $N_{\text{H}} = 9.5^{+4.9}_{-7.1} \times 10^{23}$  respectivamente. Ambos resultados são compatíveis com a classificação *Compton-thick* baseada em raios-X. A formação estelar em regiões selecionadas de NGC 1386 e NGC 7213 é estimada a partir da luminosidade em  $8 \mu\text{m}$  e na linha de [NeII] em  $12.8 \mu\text{m}$ . Verificamos que estes indicadores são correlacionados, mas apresentam um fator 10 entre as estimativas de taxa de formação estelar (SFR). Através de fotometria de alta resolução angular e espectros do telescópio Spitzer, demonstramos que pode existir uma correlação entre a SFR circum-nuclear e a taxa de acreção do buraco negro (BHAR), para AGNs com  $L_{\text{bol}} > 10^{42} \text{ ergs}^{-1}$ , em uma amostra de 16 galáxias ativas. Estimamos a SFR com base na emissão em  $11.3 \mu\text{m}$  de PAH, e a BHAR a partir da luminosidade em raios-X e uma transformação para luminosidade bolométrica. A maioria das galáxias que se encaixa nesta correlação apresenta SFR entre 10 e 100 vezes maior do que a BHAR. O gás ionizado, na galáxia principal do par em interação AM2306-721, é estudado através de espectroscopia de campo integral com o instrumento GMOS. Demonstramos que o eixo de rotação da região nuclear está desalinhado cerca de  $20^\circ$  com relação a rotação do disco galático. Comparando os dois movimentos identificamos uma componente radial no movimento do gás ionizado, com velocidades de  $\sim 50 \text{ km/s}$  no sentido do núcleo. Na região de encontro entre o gás que flui na direção do núcleo com o gás que acompanha a rotação do disco, verificamos larguras equivalentes de  $\text{H}\alpha$  de até  $32 \text{ \AA}$ , compatíveis com a presença de populações estelares com idades  $\lesssim 10^7$  anos.

# *Abstract*

The current paradigm for galaxies with active nuclei holds that the nuclear emission is due to accretion to a super massive black hole (SMBH), enshrouded in a toroidal distribution of clouds of high optical depth. There is a growing consensus that the evolution of the SMBH is linked to the evolution of its host galaxy, although the mechanisms responsible for the correlations we see today are not entirely understood. The circumnuclear star formation is one possible link to the above mentioned co-evolution. We begin this thesis discussing the properties of the dusty torus, known through their spectrum in the mid-infrared. We show, by fitting of the CLUMPY radiative models, that the tori of the Sy2 Galaxies NGC 1386 and Mrk 3 are intrinsically distinct from the torus of NGC 7213. Using the same models we derive the column densities for the Sy2 galaxies, finding values of  $N_{\text{H}} = 2.0^{+1.2}_{-1.6} \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ , e  $N_{\text{H}} = 9.5^{+4.9}_{-7.1} \times 10^{23}$ . Both results are compatible with the Compton-thick classification based on X-Rays. Star formation in selected regions of NGC 1386 and NGC 7213 is assessed based on the 8  $\mu\text{m}$  luminosity and the [NeII] line at 12.8  $\mu\text{m}$ . These indicators are correlated, although they differ by a factor of 10 in the star formation rate (SFR). Through the use of high angular resolution photometry and spectra from the Spitzer telescope, we show that there might be a correlation between the SFR and black hole accretion rate (BHAR), for AGNs with  $L_{\text{bol}} > 10^{42} \text{ ergs}^{-1}$ , in a sample of 16 active galaxies. We estimate the SFR based on the emission at the 11.3  $\mu\text{m}$  PAH band, and the BHAR from the X-Ray luminosity and a transformation to the bolometric luminosity. The majority of galaxies that fit this correlation show SFR between 10 and 100 times larger than the BHAR. The ionised gas, in the main galaxy of the interacting pair AM2306-721, is studied via integral field spectroscopy with the GMOS instrument. We show that the rotation axis of the nuclear region is misaligned by  $20^\circ$  with respect to the rotation of the galactic disk. Comparing both movements we find a radial component in the ionised gas kinematics, with velocities up to  $\sim 50 \text{ km/s}$  towards the nucleus. In the region where inflowing gas meets the gas following the galactic disk, we find equivalent widths of the  $\text{H}\alpha$  line of up to 32  $\text{\AA}$ , compatible stellar populations with ages smaller than  $10^7$  years.

# 1 *Introdução*

## 1.1 Núcleos Galácticos Ativos

Já é um fato bem estabelecido que a maioria das galáxias que apresentam bojo estelar, possuem em seus centros um buraco negro super massivo (Ferrarese e Merritt, 2000; Gebhardt et al., 2000, SMBH)<sup>1</sup>. Eventualmente este SMBH pode consumir matéria da galáxia hospedeira através de um disco de acreção, convertendo energia gravitacional em radiação e calor, neste caso sendo classificado como um núcleo ativo de galáxia (AGN). Dentre as várias classes de AGNs, chamamos a atenção para duas, conhecidas como Seyfert 1 e Seyfert 2 (Sy1 e Sy2 respectivamente), cujo critério de distinção diz respeito a presença de linhas de Balmer alargadas pela dispersão de velocidades do gás emissor (Khachikian e Weedman, 1974). As que possuem componentes larga e estreita, com velocidades  $\sim 10^4$  km/s e  $< 10^3$  km/s respectivamente, são classificadas como Sy1. As que apresentam apenas a componente estreita são classificadas como Sy2.

A partir da análise de observações polarimétricas desenvolveu-se uma teoria para explicar a diferença entre os AGNs que ficou conhecida como o modelo unificado (Antonucci e Miller, 1985; Antonucci, 1993). Este modelo supõe que ambos os tipos de AGN são intrinsecamente o mesmo objeto, e que a diferença nos espectros surgiria da inclinação da linha de visada em relação a um toroide de poeira que circunda o disco de acreção, como ilustrado na figura 1.1. É fácil perceber que a região de linhas largas (BLR) deve ser interna à região de linhas estreitas (NLR), e supõe-se que a BLR seja interior ao toro de poeira enquanto a NLR se estende por distâncias maiores e inclusive ao longo da direção polar. Desta forma um observador que esteja próximo a direção normal ao plano do toro poderá verificar a presença de ambas as componentes nas linhas de emissão. Em contrapartida, um observador próximo ao plano do toro terá a sua visão da BLR obstruída por este último, tendo acesso apenas à região de linhas estreitas que se encontra mais distante

---

<sup>1</sup>Neste trabalho manteremos as siglas em inglês para facilitar a compreensão de leitores habituados aos periódicos internacionais

do núcleo.

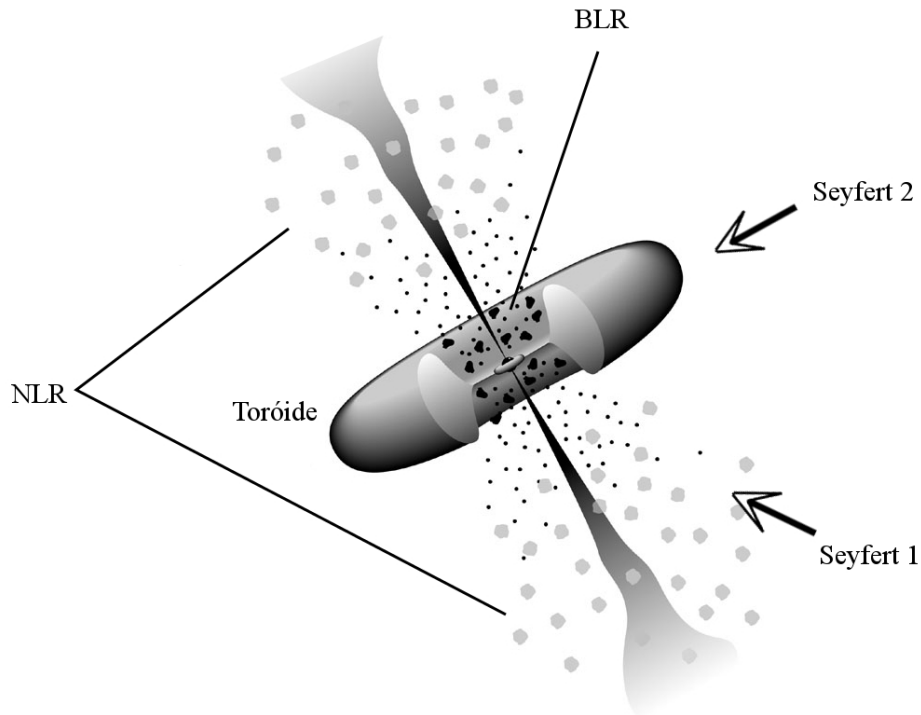


Figura 1.1: Diagrama ilustrativo do modelo unificado para AGNs. As setas indicam duas linhas de visada diferentes. Adaptado de Urry e Padovani (1995).

## 1.2 Propriedades e modelagem do toro

O toro é provavelmente composto por grãos de grafite e silicato (Granato e Danese, 1994). Os grãos de grafite emitem como um corpo negro, com o pico de sua emissão próximo a  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ , correspondente sua temperatura de sublimação (Barvainis, 1987). Os grãos de silicato por sua vez são detectados principalmente através de uma banda de emissão/absorção em  $9.7\mu\text{m}$  (Pier e Krolik, 1992; Granato e Danese, 1994; Siebenmorgen et al., 2005; Fritz et al., 2006; Rodriguez-Ardila e Mazzalay, 2006; Riffel et al., 2006, 2009; Elitzur, 2012; Feltre et al., 2012). Estas feições espectrais estão relacionadas com o modelo unificado. Por exemplo, Hao et al. (2007) demonstrou que quasares e Sy1 são predominantemente caracterizadas por silicato em emissão em  $9.7\mu\text{m}$  enquanto Sy2 apresentam silicato em absorção. A tecnologia disponível não permite a observação direta do toro de poeira, por que as suas dimensões são menores do que o mínimo necessário para resolver a estrutura espacialmente. As primeiras estimativas para o tamanho físico do toro se basearam em modelos de emissão da poeira quente, e levaram a raios da ordem de dezenas a centenas de parsecs (Pier e Krolik, 1993; Granato e Danese, 1994).

A distribuição de matéria no toro é abordada principalmente a partir de duas premissas: a) que a matéria se distribui de forma suave por toda a extensão do toro (Pier e Krolik, 1992; Granato et al., 1997; Siebenmorgen et al., 2004; Fritz et al., 2006), e b) que a matéria se agrupa em nuvens de alta profundidade óptica e dimensões muito menores do que o toro (Krolik e Begelman, 1988; Nenkova et al., 2002; Tristram et al., 2007). As velocidades necessárias para sustentar o volume do toro são da ordem de  $100 \text{ km s}^{-1}$ , e se esta velocidade fosse devida a distribuição maxwelliana da velocidade das partículas, o toroide teria uma temperatura próxima a  $10^6 \text{ K}$ , o que por sua vez proíbe a formação de poeira cuja temperatura de sublimação é da ordem de  $10^3 \text{ K}$ . Portanto estas velocidades devem estar associadas ao movimento orbital de conjuntos de partículas que raramente se chocam, ou nuvens (Pier e Krolik, 1992).

Antes da adoção generalizada do modelo de nuvens, a suposição corrente para os códigos de transferência radiativa era a distribuição suave de matéria (Fritz et al., 2006, por exemplo). Entre as limitações destes modelos estão a exigência de uma linha de visada afastada do plano do toro para explicar a emissão da poeira, e a impossibilidade de temperaturas diferentes em raios semelhantes para a poeira no toro, que já foi inferida a partir de observações interferométricas (Jaffe et al., 2004).

Modelos que supõe distribuição em nuvens são capazes de gerar diversos regimes de radiação em uma mesma distância radial do núcleo, como resultado direto da alta profundidade óptica de cada nuvem, como os modelos CLUMPY de Nenkova et al. (2002, 2008a, 2008b). É fácil perceber que nos modelos com nuvens a inclinação da linha de visada não é o único fator que determina a visibilidade da BLR, bastando que no momento da observação o caminho até a vizinhança do SMBH esteja livre de qualquer nuvem. Nos modelos CLUMPY a possibilidade deste evento é sempre maior do que zero, mesmo que este caminho esteja no plano do toro, por que o número de nuvens é relativamente pequeno. Por um raciocínio semelhante podemos concluir a detecção de poeira em emissão também não precisar estar necessariamente ligada ao ângulo de visada. Para números pequenos de nuvens de qualquer profundidade óptica, ou para altas profundidades ópticas ( $\tau_v \sim 150$ ) e até 10 nuvens no equador é possível encontrar o silicato em emissão (Nenkova et al., 2008b).

Casos extremos de absorção da radiação da fonte nuclear são os objetos *Compton-thick* (Comastri e Fiore, 2004), cuja densidade de coluna se iguala ao inverso da seção de choque de Thomson, ou seja  $N_{\text{H}} \sim 1.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ . A classificação destes objetos é realizada principalmente por estudos de raios-X, onde a característica mais marcante é a



alta largura equivalente da linha  $K\alpha$  do Ferro. Se a radiação fosse direta esta linha se confundiria com o contínuo, mas no caso de uma *Compton-thick* estamos vendo a reflexão da linha  $K\alpha$  nas nuvens do toro (Ghisellini et al., 1994).

Observações interferométricas da emblemática galáxia NGC 1068 desde a década de 2000 têm sugerido valores próximos ou inferiores a um parsec (Weigelt et al., 2004; Jaffe et al., 2004, por exemplo). Espectros no infravermelho médio, com alta resolução angular, tem indicado também a possibilidade de outras geometrias para a poeira que circunda o AGN. Em pelo menos três casos o modelo de poeira localizada apenas no toro foi preterido em favor de um modelo que acomode parte do material nas regiões polares (Tristram et al., 2012; Hönig et al., 2012, 2013), a saber: NGC 3783, a galáxia Circinus e NGC 424. Tristram et al. (2014) e López-Gonzaga et al. (2014), a partir de dados do MIDI/VLTI, argumentam que a emissão de poeira quente é bem representada por um modelo que inclui uma componente polar em formato de cone, para as galáxia Circinus e NGC 1068 respectivamente.

### 1.3 Coevolução entre o AGN e a galáxia hospedeira

Sabemos que algumas propriedades dos bojos galácticos possuem correlação positiva com os núcleos ativos que eles abrigam (Kormendy e Richstone, 1995). Provavelmente a mais conhecida destas relações é a correspondência entre a massa do SMBH ( $M_{\bullet}$ ) e a dispersão de velocidades das estrelas do bojo ( $\sigma$ ), a chamada relação  $M_{\bullet} - \sigma$  (Ferrarese e Merritt, 2000; Gebhardt et al., 2000). Também são encontradas correlações entre  $M_{\bullet}$  e a massa estelar do bojo (Magorrian et al., 1998), e a concentração do perfil de brilho do bojo (Graham et al., 2001).

A presença destas correlações sugere a existência de uma ligação causal entre a formação do esferóide e do buraco negro central, ou ainda, que a evolução de ambos seja regulada por uma causa comum. Um dos possíveis elos entre os dois fenômenos é a formação estelar circum-nuclear, já que ambos dependem do transporte de gás para a região central da galáxia. Mesmo que longe de ser uma propriedade comum a todos os AGNs, diversos estudos relatam a presença de formação estelar e/ou populações jovens em galáxias Seyfert (Rodríguez Espinosa et al., 1987; González-Delgado e Pérez, 1993; Storchi-Bergmann et al., 1996, 2000; Storchi-Bergmann et al., 2005; Cid Fernandes et al., 2001; Riffel et al., 2007; Davies et al., 2007; Brandl et al., 2012). Dottori e Pastoriza (1986), por exemplo, concluem através do ajuste de populações estelares baseado em linhas de absorção, que

as galáxias Seyfert apresentam populações sistematicamente mais jovens em seus núcleos, do que as galáxias com núcleos classificados como peculiares ou normais.

Kauffmann et al. (2003), por exemplo, estudaram uma amostra de mais de 22 mil galáxias ativas do *Sloan Digital Sky Survey*, e concluíram que os AGNs de mais alta luminosidade são comumente encontrados em bojos com populações estelares jovens. Análises da luminosidade do AGN e a formação estelar sobre períodos cosmológicos demonstram que ambos experimentaram um pico em torno de  $z \sim 2$  (Silverman et al., 2008). Além disso, LaMassa et al. (2013) e Diamond-Stanic e Rieke (2012) encontram correlações positivas entre a luminosidade do AGN, que se traduz na taxa de acreção do buraco negro (BHAR), e as taxas de formação estelar (SFR). Já Rosario et al. (2012) encontram que esta correlação só é perceptível em galáxias em  $z < 1$ , e mesmo assim somente para os AGNs mais luminosos ( $L_{\text{bol}} \gtrsim 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ ).

No campo teórico, modelos semi-analíticos apontam para uma correlação entre SFR e BHAR enquanto é mantido um fluxo de gás, partindo das regiões mais externas da galáxia hospedeira para a centena de parsecs central (Kawakatu e Wada, 2008; Wutschik et al., 2013). Simulações hidrodinâmicas também tem retornado correlações positivas para formação estelar circum-nuclear e a acreção ao buraco negro central (Hopkins e Quataert, 2010; Volonteri et al., 2015), sendo que a SFR global parece estar menos correlacionada.

O ponto chave para a ligação entre SFR e BHAR é o mecanismo de perda de momento angular pelo gás. As fusões entre galáxias ricas em gás parecem ser uma saída óbvia, contudo existem demasiadas galáxias não perturbadas com AGNs de alta luminosidade para que este processo seja considerado dominante. Barras são normalmente invocadas como responsáveis pela transferência de momento angular que facilitaria o influxo de material para o núcleo (Lynden-Bell e Kalnajs, 1972; Hernquist e Mihos, 1995). Além disso, existem estudos demonstrando que interações favorecem o surgimento da barra (Lang et al., 2014).

Apesar de toda as evidências em favor de uma relação entre a taxa de acreção do buraco negro central, medida muitas vezes pela emissão de espécies iônicas e moleculares, e a formação estelar circum-nuclear, é preciso manter em mente a característica variável dos AGNs. Não apenas em escalas de dias (Schimoia et al., 2015, e.g. ) mas também em escalas de  $10^5 - 10^7$  anos (Novak et al., 2011; Schawinski et al., 2015). A identificação de gás ionizado, com características de excitação por AGN porém desconectado do núcleo, como as chamadas galáxias *green bean*, indica que a atividade nuclear pode cessar em períodos tão baixos quanto  $5 \times 10^4$  anos (Keel et al., 2015). Mesmo que houvesse

conexão entre o crescimento do SMBH e a população estelar do núcleo, um observador limitado a um instante de inatividade do AGN poderia concluir que os dois fenômenos são independentes.

É importante ressaltar que o estudo das relações entre AGN e galáxias hospedeiras tem implicações relevantes sobre a cosmologia. Além da já mencionada concordância entre os picos de formação estelar e atividade nuclear na história do Universo, a análise dos mecanismos que levam à acreção de matéria ao buraco negro central pode fornecer subsídios para compreender a existência de SMBHs em altos *redshifts*. Sabemos, através da detecção de quasares, que buracos negros de até  $10^{10} M_{\odot}$  são encontrados em  $z > 6$ , ou seja, quando o Universo possuía menos de 1 bilhão de anos (Wu et al., 2015). Estes objetos representam a versão mais energética do fenômeno AGN, de forma que a física responsável por seu rápido crescimento é a mesma que rege as galáxias Seyfert do Universo local.

## 1.4 Feições espectrais no infravermelho médio: uma maneira de acessar a formação estelar

A análise do espectro no infravermelho médio (MIR) constitui ferramenta fundamental para investigar os processos físicos em regiões de alta extinção como aquelas próximas ao toro. Na galáxia NGC 1097, por exemplo, Storchi-Bergmann et al. (2005) argumentam que a detecção de um *starburst* em uma distância de 9 pc do núcleo se deu em parte por um obscurecimento relativamente baixo ( $A_V \sim 3 \text{ mag}$ ) na região central da galáxia. Extinções superiores tornariam impossível a detecção de fenômenos similares na faixa do visível.

Além da já mencionada feição do silicato em  $9.7\mu\text{m}$  esta faixa espectral também apresenta linhas iônicas de estrutura fina como [SIV] e [NeII], e ainda bandas moleculares comumente associadas a formação estelar. Desde os primeiros estudos sobre o MIR na década de 1970 as bandas de emissão em  $6.2$ ,  $7.7$ ,  $8.7$  e  $11.3\mu\text{m}$  tem sido encontradas nas mais variadas classes de objetos astronômicos, de regiões HII a nebulosas planetárias (Gillett et al., 1973; Allamandola et al., 1989). A figura 1.2 apresenta espectros que exemplificam estas características. Gradualmente se consolidou a compreensão destas bandas como fruto da emissão de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), moléculas com cerca de  $\sim 50$  a  $\sim 2000$  átomos de carbono arranjados em anéis aromáticos, circundadas por átomos de hidrogênio. Fótons ultravioleta (UV) absorvidos por PAHs são eventualmente

reemitidos por fluorescência no MIR, através dos vários modos de vibração possíveis para a molécula.

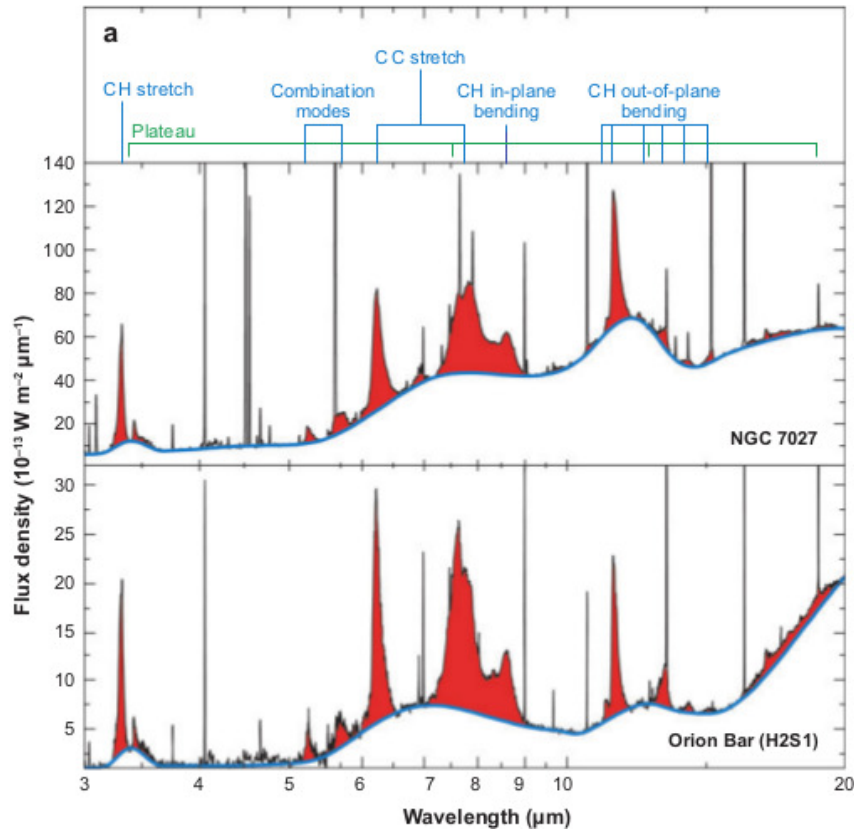


Figura 1.2: Exemplos de espectros do MIR com proeminentes bandas de PAH. Os modos de oscilação estão indicados acima. Figura retirada de Tielens (2008).

Por conta da excitação por fótons UV e das diferentes respostas de cada banda às características da fonte ionizante, as bandas de PAH tem sido utilizadas para estimar a formação estelar (Mizutani et al., 1994; Imanishi e Dudley, 2000; Imanishi, 2002; Rodriguez-Ardila e Viegas, 2003) e inclusive servir como ferramenta de diagnóstico para determinar o grau de atividade nuclear de galáxias (Sales et al., 2010, 2011). As variações nas bandas de PAH não se restringem apenas às intensidades relativas como também incluem o próprio perfil das bandas. Variações de intensidade são observadas entre galáxias (Smith et al., 2007a) e também em diferentes regiões de uma mesma nebulosa ou região HII (Verstraete et al., 2001; Bregman e Temi, 2005; Galliano et al., 2008). Finalmente entre o material do ISM e as camadas ejetadas em nebulosas planetárias ou estrelas pós-AGB nota-se uma acentuada alteração no perfil das bandas centradas em  $6.2\mu\text{m}$  e  $7.7\mu\text{m}$  (Diedenhoven et al., 2004).

## 1.5 Motivação

A região nuclear das galáxias é onde as conexões entre a física da galáxia hospedeira e do AGN são mais aparentes. Portanto, o estudo desta região é fundamental para compreendermos os processos que associam a evolução destes dois entes, supondo que a ligação entre eles não seja meramente coincidente. Para tentar estabelecer a presença de vínculos nos focamos em dois aspectos principais: a formação estelar e as características do toro.

A composição e distribuição de matéria no toro são temas que ainda carecem de respostas definitivas, e esta estrutura é fundamental na ligação do AGN com o meio interestelar da galáxia hospedeira. Afinal, o toroide é o primeiro a sentir qualquer efeito do AGN depois da região de linhas largas. É natural supor que existam diferenças intrínsecas entre os toroides, e se eles são diferentes, estas diferenças também se refletem no ISM da galáxia hospedeira? Como isso se relaciona com a evolução do conteúdo estelar das galáxias?

Já a formação estelar constitui o cerne da questão do consumo de gás. O mais natural seria esperar que quando existe influxo de gás, tanto a acreção quanto a formação estelar deveriam ser estimuladas. É possível que o gás flua para a região nuclear, alimente o buraco negro e não forme estrelas, ou vice-versa? Se existe uma correlação entre SFR e BHAR ela é a mesma para qualquer regime de acreção? Como exatamente o poderíamos ver o fluxo de gás para o centro formando estrelas? Que papel podem ter as interações entre galáxias?

No intuito de contribuir para o esclarecimento destas questões analisamos imagens e espectros de sete diferentes instrumentos, nas faixas espectrais do visível e do infravermelho médio, para 21 galáxias ativas. Através destes dados inferimos propriedades da região circum-nuclear em escalas que chegam a dezenas de parsecs para alguns alvos.

## 2 *Observações*

Para obter um quadro completo dos processos que dominam a emissão no MIR, imagens e espectros de seis instrumentos de quatro observatórios diferentes foram utilizados. São eles: (i) a câmera Infrared Array Camera (Fazio et al., 2004); (ii) o espectrógrafo Infrared Spectrograph (Houck et al., 2004), ambos a bordo do telescópio espacial Spitzer; (iii) o espectrógrafo Thermal-Region Camera and Spectrograph (Telesco et al., 1998; De Buizer e Fisher, 2005) no observatório Gemini-South (programa GS-2012A-Q-7, investigador principal Dinalva A. Sales); (iv) o espectrógrafo Gemini Multi-Object Spectrograph (programa GS-2014B-Q-74, investigador principal José A. H. Jimenez); (v) câmara CanariCam ligada ao Gran Telescopio Canarias (GTC40-13B); (vi) imagens do instrumento VISIR ligado ao telescópio UT3 do conjunto Very Large Telescope. Os dados do telescópio espacial Spitzer e do VLT foram obtidos de arquivos públicos. Cada conjunto de dados é individualmente discutido em detalhe nas próximas seções.

Para facilitar a leitura desta tese, a tabela 2.1 descreve as fontes de dados apresentadas neste capítulo e os objetivos científicos pretendidos com cada uma, que serão discutidos separadamente nos capítulos 3, 4 e 5.

### 2.1 **Dados do telescópio Spitzer**

IRAC é uma câmera sensível ao MIR capaz de imagear simultaneamente uma área de  $5.2'' \times 5.2''$  em quatro diferentes filtros, com comprimentos de onda centrais 3.6, 4.5, 5.8 e  $8\mu\text{m}$ . As curvas de transmissão destes filtros são apresentadas na figura 2.1. As observações referentes as galáxia NGC 1386 e NGC 7213 datam de 15 de Dezembro de 2004 e 9 de Maio de 2005 respectivamente. Neste trabalho não foram produzidas novas reduções dos dados de arquivo, ao invés disso usamos as versões já calibradas disponíveis.

O filtro centrado em  $8\mu\text{m}$  inclui a emissão das moléculas de PAH advindas dos modos de estiramento C-C e dobra coplanar C-H, nos comprimentos de onda 7.7, 7.8 e  $8.6\mu\text{m}$

Tabela 2.1: Objetivos científicos e fontes de dados

Objetivos Científicos	Fontes de dados	Capítulos
Geometria do toroide de poeira que circunda o AGN.	Telescópios Gemini Sul e Norte; espectros adquiridos com os instrumentos T-ReCS e Michelle.	Capítulo 3.
Formação estelar em escalas de milhares de parsecs.	Imagens e espectros do telescópio espacial Spitzer.	Seção 4.2
Formação estelar em escalas de centenas de parsecs e sua correlação com a atividade nuclear.	Imagens da CanariCam, no Gran Telescopio Canarias; imagens do VISIR no telescópio ESO-VLT; espectros do telescópio espacial Spitzer.	Seção 4.3
Cinemática e meio interestelar na galáxia principal do par em interação AM2306-721.	Espectros através de unidade de campo integral observados com o instrumento GMOS no telescópio Gemini Sul.	Capítulo 5.

(Leger e Puget, 1984; Tielens, 2008) enquanto o filtro  $3.6\mu\text{m}$  revela praticamente apenas a emissão estelar. Para obter uma imagem de praticamente pura emissão de PAH (daqui em diante PAH8) subtraímos da imagem em  $8\mu\text{m}$  o fluxo estelar estimado a partir da imagem em  $3.6\mu\text{m}$ . A subtração é da forma

$$F_{\nu}(\text{PAH8}) = F_{\nu}(8\mu\text{m}) - \alpha F_{\nu}(3.6\mu\text{m}), \quad (2.1)$$

onde  $F_{\nu}(\text{PAH8})$  é a densidade de fluxo de fontes não estelares (principalmente emissão de PAH),  $F_{\nu}(8\mu\text{m})$  e  $F_{\nu}(3.6\mu\text{m})$  são as densidades de fluxo originais nos respectivos filtros e  $\alpha$  é o fator de escala para o fluxo estelar em  $8\mu\text{m}$ . Helou et al. (2004), empregando os modelos Starburst99 (Leitherer et al., 1999), concluíram que a razão entre os fluxos estelares em  $8\mu\text{m}$  e  $3.6\mu\text{m}$  é praticamente independente da metalicidade e do histórico de formação estelar, validando a utilização de um fator constante, no caso  $\alpha = 0.232$  para remover a componente estelar da imagem em  $8\mu\text{m}$ . Nas figuras 2.2 e 2.3 ilustramos este procedimento.

Fica claro que a subtração da componente estelar não removeu o núcleo das galáxias, que certamente precisaria de um fator  $\alpha$  distinto. É possível também que haja um erro nesta subtração devido principalmente a estimativa de estrelas de baixa massa, que teriam maior efeito sobre inclinação do contínuo nesta faixa espectral. Contudo as estrelas de campo foram quase completamente removidas com este fator o que valida a sua utilização. Por exemplo as estrelas nas coordenadas aproximadas (35, 30) e (-30, 60) para a galáxia

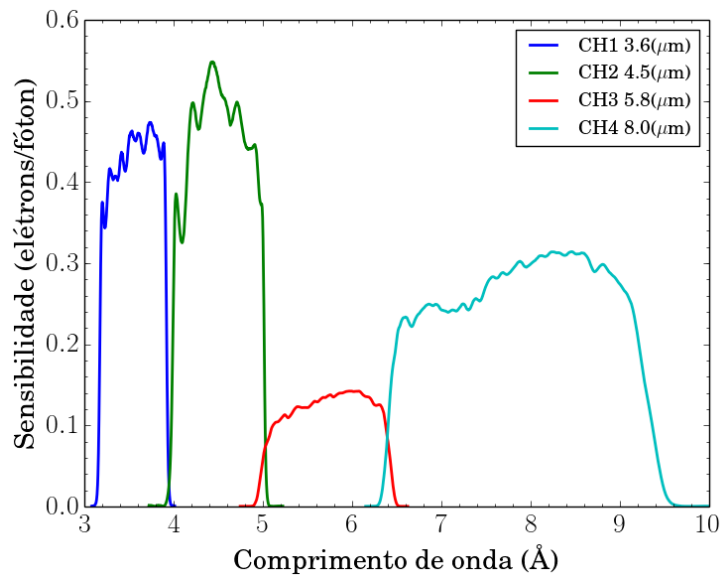


Figura 2.1: Curvas de transmissão dos filtros do instrumento IRAC a bordo do telescópio espacial Spitzer.

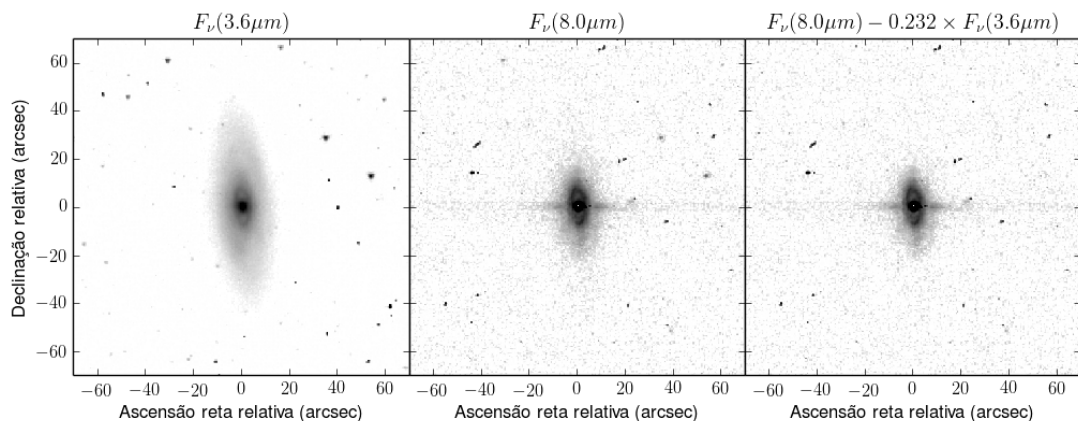


Figura 2.2: Procedimento de subtração da componente estelar das imagens de  $8.0\mu\text{m}$  para a galáxia NGC 1386.

NGC 1386; e  $(-40, -40)$  e  $(50, -45)$  nas imagens da galáxia NGC 7213.

### 2.1.1 Espectros em modo de mapeamento

Foram utilizados dados de arquivo do IRS em modo de mapeamento, que produz espectros em três dimensões de forma similar a uma unidade de campo integral (IFU) ao tomar diversos espectros de fenda longa em diferentes posições. As observações fazem parte do programa de número 3269, com Jack Gallimore como investigador principal. Estes dados foram publicados pela primeira vez em Wu et al. (2009) e também apareceram em um artigo por Gallimore et al. (2010), ambos se concentrando em integrar os spaxels para produzir um espectro unidimensional com estritas definições para a abertura central.



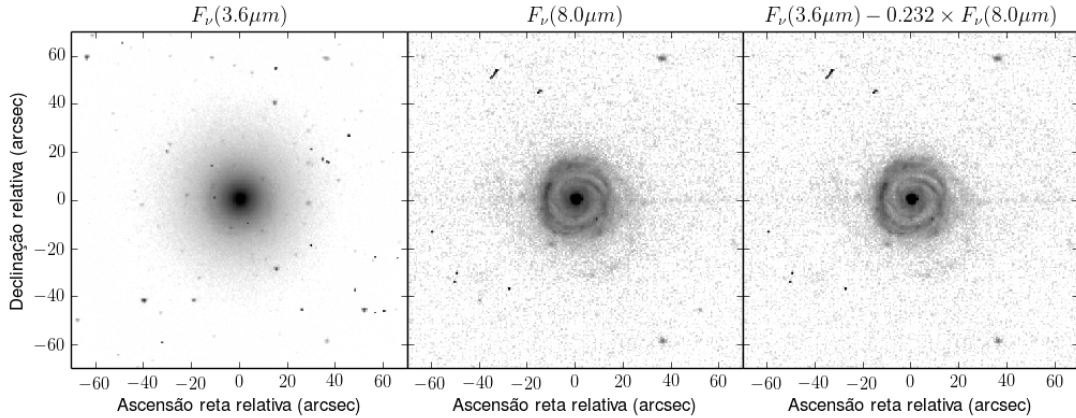


Figura 2.3: Procedimento de subtração da componente estelar das imagens de  $8.0\mu\text{m}$  para a galáxia NGC 7213.

Neste trabalho adotamos uma abordagem diferente tentando compreender a natureza das fontes do MIR em diversas regiões que incluem a emissão estendida de PAH.

A cobertura espectral do IRS se estende de  $5.1\mu\text{m}$  até aproximadamente  $40\mu\text{m}$ , com um poder resolutor que varia de 50 - 127 em múltiplas ordens de difração, que correspondem aos módulos short-low (SL) de 5 a  $14\mu\text{m}$  e long-low (LL) de  $14\mu\text{m}$  e  $40\mu\text{m}$ . Uma vez que estamos interessados em resolver o núcleo, e as estruturas maiores vistas nas imagens da IRAC, focamo-nos nos dados do módulo SL. Desta maneira podemos ter extrações espectrais em uma resolução espacial três vezes maior do que o módulo LL, mas com a desvantagem da restrição em comprimento de onda. Foram realizadas três extrações de aberturas virtuais circulares com raio de  $3.6''$  ( $\sim 210\text{pc}$ ) para a NGC 1386 e quatro extrações para NGC 7213 ( $\sim 420\text{pc}$ ), centradas no núcleo e em regiões de intensa emissão de PAH. Os espectros são mostrados na figura 2.4 e as aberturas são ilustradas na figura 4.1.

O software CUBISM (Smith et al., 2007a) foi empregado para construir e analisar cubos de dados do espectro do IRS, partindo dos dados basicamente calibrados (BCD). As exposições do IRS consistem em duas ordens de difração espacialmente justapostas, de forma que quando o alvo está posicionado sobre o segmento SL1 ( $7.4 - 14.5\mu\text{m}$ ) o segmento SL2 ( $5.2 - 7.7\mu\text{m}$ ) está tomando uma exposição do fundo e vice-versa. Os níveis de fundo avaliados a partir destas exposições complementares foram subtraídos dos espectros do alvo científico. As regiões sombreadas da figura 2.4 representam a estimativa de erro do próprio CUBISM avaliada durante a extração dos espectros, posteriormente convoluída por uma gaussiana definida por  $\sigma = 5\text{px}$ .

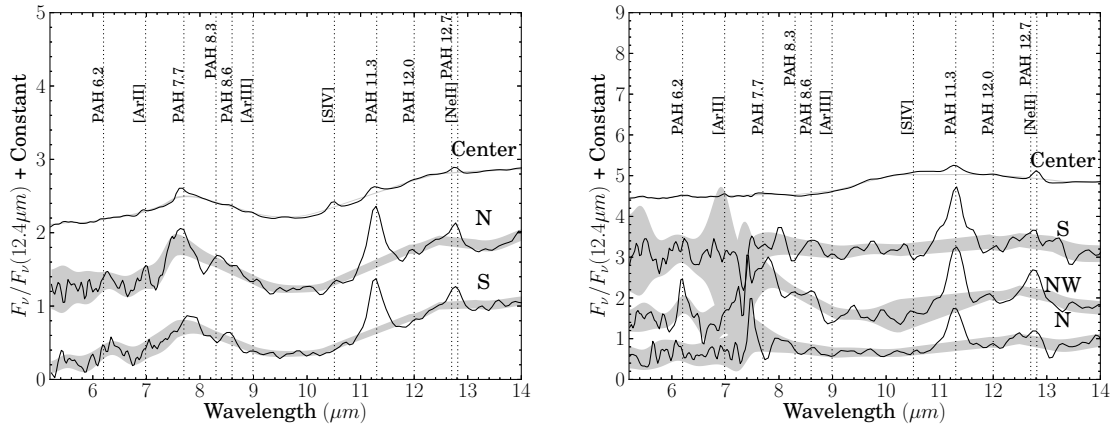


Figura 2.4: Espectros do IRS em modo de mapeamento para NGC 1386 (*esquerda*) e NGC 7213 (*direita*). Bandas de PAH são detectadas em todos os espectros. Adicionalmente, fica claro que a linha de alta ionização [SIV] está presente apenas na extração central da galáxia NGC 1386. As regiões sombreadas representam a incerteza avaliada pelo CUBISM durante a extração dos espectros.

## 2.2 Espectros do T-ReCS

Com o objetivo de investigar com maior detalhe a região nuclear destas galáxias, analisamos observações com os instrumentos T-ReCS (programa GS-2011B-Q-29, PI: Dinalva Sales) e Michelle (programa GS-2009B-Q-61, PI: Miriani Pastoriza) dos telescópios Gemini Sul e Norte, alcançando uma resolução espacial de  $0.36''$ . Os dados utilizados aqui são do modo de baixa resolução espectral centrado em  $10\mu\text{m}$ , com um poder resolutor de  $R \sim 100$  e cobertura espectral entre 8 e  $13\mu\text{m}$ . A fenda possui uma largura projetada no plano celeste de  $0.35''$  que corresponde a 21 pc e 41 pc nas distâncias de NGC 1386 e NGC 7213 respectivamente. A tabela 2.2 contém a lista de alvos observados. Na coluna de tempos de exposição as observações das galáxias o número de conjuntos de exposições está explicitado.

Tabela 2.2: Registro de observações com o T-RecS

Objeto	Tipo	RA (h)	DEC ( $^{\circ}$ )	K (mag)	$t_{\text{exp}}$ (s)
HD 209688	K3 III	22 06 06.9	-39 32 36.1	1.272	149
NGC 7213	Sy1	22 09 16.3	-47 09 59.8	7.04	921
HD 23319	K2.5 II	03 42 50.1	-37 18 48.7	2.00	149
NGC 1386	Sy2	03 36 46.2	-35 59 57.4	8.01	981
HD 16815	K0 III	02 40 40.0	-39 51 19.4	1.71	149

Observações terrestres do MIR precisam contornar os problemas causados pela emissão da atmosfera terrestre. Nesta faixa espectral diversas bandas provenientes de transições do radical OH atingem o ponto de saturação do detector em décimos de segundo, impondo

um limite muito curto para as observações astronômicas. Adicionalmente, dada a rápida variabilidade atmosférica, é preciso tomar amostras da emissão telúrica constantemente para possibilitar a subtração destes artefatos da exposição científica. No sentido contrário se faz necessária a observações de estrelas padrão, temporalmente próximas da observação científica, para compensar as bandas de absorção telúricas e ao mesmo tempo realizar a calibração em fluxo dos espectros.

Para a remoção da emissão atmosférica foi empregada a técnica padrão de *chopping-nodding*, na qual um espelho se encarrega de mover o alvo para fora do campo do detector (chopping) e depois de alguns ciclos o próprio telescópio é movido (nodding) dando início a um novo conjunto de exposições. O desvio no campo foi de  $15''$  tanto para chopping quanto para nodding. O tempo de cada exposição foi de 43.1 ms, e para cada posição de nodding 5 pares céu - objeto foram observados. O tempo total de integração sobre o alvo foi de 981 s para NGC 1386 e 1248 s para NGC 7213.

Todo o processo de redução foi realizado com o pacote MIDIR para a plataforma IRAF (Tody, 1986, 1993). A subtração de exposições consecutivas de forma a remover a emissão atmosférica foi feita de forma automática. A calibração em comprimento de onda baseou-se na identificação de 5 ou mais linhas de emissão da atmosfera, levando a uma função de dispersão ajustada por um polinômio de Chebyshev de quarta ordem. Para a calibração em fluxo e remoção de absorção telúrica utilizamos espectros de estrelas padrão, observadas com menos de uma hora de intervalo entre estas observações e as exposições científicas. Essa restrição temporal exigiu que mais de uma estrela padrão fosse observada para cada galáxias.

O perfil espacial destas galáxias é muito próximo àquele de uma fonte pontual, em parte devido ao intenso brilho do AGN, de forma que existe uma grande contaminação da emissão estendida por parte do núcleo. A figura 2.5 apresenta os perfis espaciais para as duas galáxias acompanhadas de uma estrela padrão. Comparando-se a galáxia à estrela padrão fica claro que a emissão da galáxia corresponde a uma fração diminuta do fluxo disperso do AGN em todos os pontos acima do ruído de fundo. Em outras palavras, em qualquer ponto que o sinal é suficiente para garantir uma detecção ( $> 3\sigma$  nesta acepção) o fluxo é dominado pelo núcleo ativo.

Para obter um espectro livre da influência do núcleo realizamos duas extrações para cada galáxia: uma tendo a largura total a meia altura (FWHM) de uma estrela padrão e outra abarcando toda a luz disponível, o que resulta em praticamente 4 vezes a FWHM da fonte pontual. Sendo  $x$  a coordenada espacial do espectro com a origem no pico

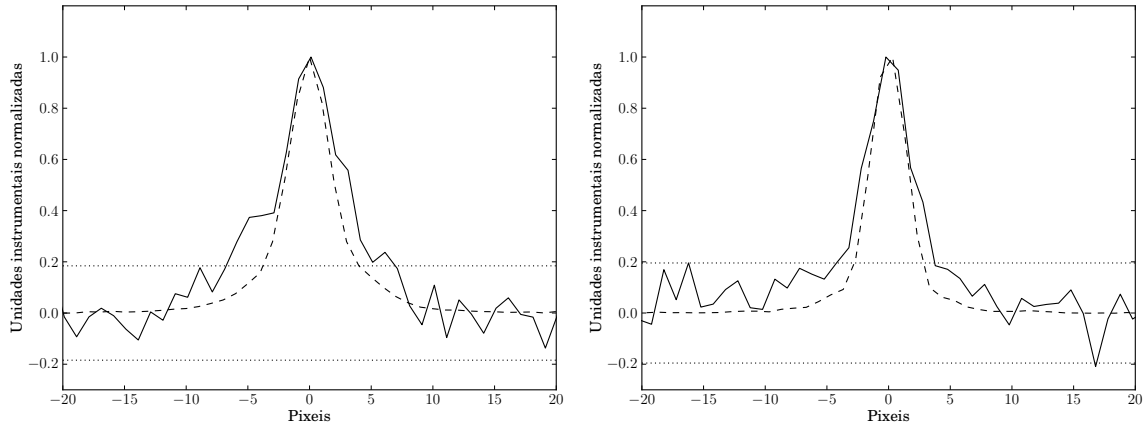


Figura 2.5: Perfis espaciais dos espectros do T-ReCS das galáxias (*linha sólida*) NGC 1386 (*esquerda*) e NGC 7213 (*direita*). As linhas pontilhadas marcam o nível  $\pm 3\sigma$  do ruído de fundo das exposições das galáxias. A linha tracejada corresponde ao perfil das estrelas HD 200644 (*esquerda*) e HD 23319 (*direta*).

de emissão,  $O(x, \lambda)$  o espectro total observado,  $H(x, \lambda)$  o espectro advindo da galáxia hospedeira e  $N(x, \lambda)$  o espectro apenas devido a componente nuclear não resolvida, então

$$H(x, \lambda) = O(x, \lambda) - N(x, \lambda). \quad (2.2)$$

Definindo a meia largura a meia altura de uma fonte pontual como  $a$ , e supondo

$$\int_{-a}^a N(x, \lambda) dx \sim \int_{-a}^a O(x, \lambda) dx \quad \text{ou} \quad \int_{-a}^a N(x, \lambda) dx \gg \int_{-a}^a H(x, \lambda) dx; \quad (2.3)$$

supondo ainda que o perfil espacial de uma fonte pontual é bem representado por uma gaussiana, temos:

$$N(x, \lambda) = I(\lambda) \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{e} \quad a = \sigma\sqrt{2\ln 2}. \quad (2.4)$$

Logo, o espectro da emissão estendida integrado na direção espacial é dado por

Tabela 2.3: Registro de observações com o VISIR

Alvo	RA (J2000)	DEC (J2000)	Tipo Esp.	PAH 11.3		Si5 11.6	
				Data Obs.	$t_{\text{exp}}$ (s)	Data Obs.	$t_{\text{exp}}$ (s)
ESO 005-G004	06 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 41.7 <sup>s</sup>	-86° 37' 55.0"	Sy2	2010-11-22	900	2010-11-22	900
ESO 138-G001	16 <sup>h</sup> 51 <sup>m</sup> 20.2 <sup>s</sup>	-59° 14' 04.2"	Sy2	2008-03-14	600	2010-07-16	140
ESO 383-G035	13 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup> 53.8 <sup>s</sup>	-34° 17' 43.8"	Sy1.2	2004-04-14	180	2010-03-10	360
IC 4329A	13 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup> 19.2 <sup>s</sup>	-30° 18' 33.8"	Sy1.2	2010-03-12	180	2009-05-10	60
IC 5063	20 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> 02.3 <sup>s</sup>	-57° 04' 07.6"	Sy1h	2006-05-05	180	2005-06-10	200
Mrk 1239	09 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> 19.1 <sup>s</sup>	-01° 36' 43.5"	Sy1.5	2005-01-28	1000	2006-03-12	600
NGC 253	00 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup> 33.1 <sup>s</sup>	-25° 17' 19.7"	Sy2/SB	2004-12-01	1500	2004-12-01	1500
NGC 5128	13 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> 27.6 <sup>s</sup>	-43° 01' 08.8"	Sy2	2006-04-09	180	2006-03-15	600
NGC 5506	14 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 14.9 <sup>s</sup>	-03° 12' 27.2"	Sy1.9	2010-02-23	180	2006-06-06	600
NGC 5995	15 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> 24.9 <sup>s</sup>	-13° 45' 28.0"	SB/Sy2	2010-07-26	1000	2010-07-26	1000
NGC 6240S	16 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> 58.8 <sup>s</sup>	+02° 24' 03.6"	LINER	2005-04-19	1800	2005-04-19	1800
NGC 7469	23 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup> 15.6 <sup>s</sup>	+08° 52' 25.3"	Sy1.2	2006-07-12	180	2006-06-15	600
NGC 7552	23 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup> 10.7 <sup>s</sup>	-42° 35' 05.4"	LINER	2005-06-15	600	2005-06-15	600

$$\begin{aligned}
\int_{-\infty}^{\infty} H(x, \lambda) dx &= \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \lambda) dx - \int_{-\infty}^{\infty} N(x, \lambda) dx \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \lambda) dx - 2 \left( \int_0^a N(x, \lambda) dx + \int_a^{\infty} N(x, \lambda) dx \right) \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \lambda) dx - 2 \int_0^a N(x, \lambda) dx \left( 1 + \frac{\int_a^{\infty} N(x, \lambda) dx}{\int_0^a N(x, \lambda) dx} \right) \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \lambda) dx - \int_{-a}^a O(x, \lambda) dx \left( 1 + \frac{\int_a^{\infty} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) dx}{\int_0^a \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) dx} \right) \\
&\sim \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \lambda) dx - 1.314 \int_{-a}^a O(x, \lambda) dx \tag{2.5}
\end{aligned}$$

Nas figuras 3.1 e 3.2 mostramos os espectros nucleares e estendido. Regiões sombreadas nesta figura representam o ruído poissoniano estimado a partir do fluxo instrumental, suavizado por uma gaussiana de  $\sigma = 5\text{px}$ .

## 2.3 Imagens no MIR em alta resolução

O segundo grupo de observações utilizado neste trabalho consiste em um conjunto de imagens de alta resolução obtidas com telescópios terrestres. Os alvos escolhidos compõem uma amostra de 16 AGNs e um LINER

### 2.3.1 Imagens da CanariCam

Quatro das galáxias da amostra de AGNs foram observadas em tempo proprietário (programa GTC40-13B, PI: José Miguel Rodríguez Espinosa) no Gran Telescopio Canarias (GTC) localizado no Observatório Roque de Los Muchachos, ilha de La Palma, Espanha. Com 10.4 m de diâmetro, este telescópio possui, à época de redação desta tese, a maior abertura dentre os telescópios ópticos/infravermelhos do mundo. A resolução teórica para um telescópio de espelho circular com este mesmo raio, considerando um comprimento de onda de  $11\mu\text{m}$ , é de aproximadamente  $\sim 0.2''$ , de maneira que a PSF, tipicamente em torno de  $0.35''$ , está muito próxima do limite de difração.

As imagens foram obtidas com a câmera e espectrógrafo para o infravermelho médio CanariCam, que possui um campo de  $25.6'' \times 19.2''$ , amostrados por  $320 \times 240$  pixels. Como em todas as observações terrestres do infravermelho médio, cada imagem é o resultado da soma de diversas exposições de algumas dezenas de milissegundos, subtraídas de exposições do “céu” com o mesmo tempo de integração. O registro destas observações encontra-se na tabela 2.4. Os tempos apresentados nesta última se referem ao tempo total de integração sobre o objeto, ou seja, estão descontadas as exposições do céu.

Tabela 2.4: Registro de observações com a CanariCam.

Alvo	RA (J2000)	DEC (J2000)	PAH2		Si5	
			Date Obs.	$t_{\text{exp}}$ (s)	Data Obs.	$t_{\text{exp}}$ (s)
NGC 931	02 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 14.4 <sup>s</sup>	+31° 18' 41.4"	2013-09-05	278	2013-09-05	265
NGC 1194	03 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup> 49.1 <sup>s</sup>	-01° 06' 13.0"	2013-09-03	625	2013-09-04	199
NGC 2146	06 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup> 37.7 <sup>s</sup>	+78° 21' 25.3"	2013-09-04	139	2013-09-03	662
NGC 2273	06 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> 08.6 <sup>s</sup>	+60° 50' 44.5"	2013-09-08	625	2013-09-06	662

Cada galáxia foi observada em dois filtros próximos em comprimento de onda, para obter uma estimativa da emissão na banda de PAH em  $11.3\mu\text{m}$  e do contínuo subjacente. Os filtros em questão foram o PAH2 ( $\lambda_c = 11.23\mu\text{m}$ ) e o Si5 ( $\lambda_c = 11.33\mu\text{m}$ ), e suas curvas de transmissão estão representadas na figura 2.6.

### Redução

Para a redução dos dados da CanariCam foi empregada a *pipeline* RedCan (González-Martín et al., 2013), juntamente com um algoritmo de “registro” das imagens. Por “registro” refiro-me ao procedimento de somar diferentes exposições levando em conta o deslocamento aparente do centro de emissão, fruto de pequenas oscilações na velocidade

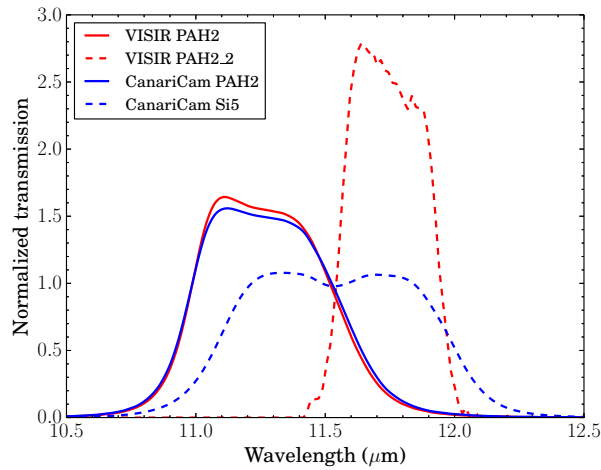


Figura 2.6: Curvas de transmissão dos filtros da CanariCam e do VISIR.

de acompanhamento do telescópio. Em linhas gerais o processo de redução para a CanariCam é bastante similar ao descrito na seção 2.2.

À época da aquisição destes dados, o instrumento apresentava um efeito estocástico que afetava a repetibilidade da posição do alvo no detector, durante o ciclo de chops e nods. Nos piores casos, variações de até 5 pixels na posição do centro de brilho são detectadas. Este efeito ensejou o desenvolvimento de um método de soma com deslocamento, entre os diferentes *savesets*, para tentar recuperar o máximo de sinal possível. Note-se que não é possível estimar as correções a partir das imagens da estrela padrão, por que cada *saveset* tem um desvio próprio. Os gráficos na figura 2.7 ilustram este problema.

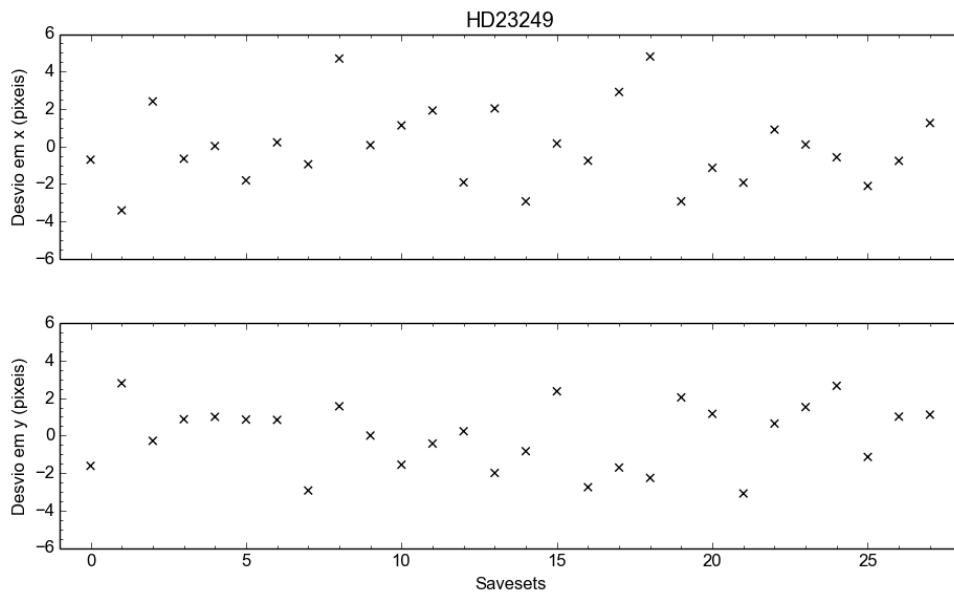


Figura 2.7: Discrepâncias na posição do centro de brilho em cada um dos *savesets* da observação típica de uma estrela padrão

Em uma primeira aproximação o problema é simples: encontrar o centro de brilho de cada *saveset* e mover a imagem de forma a restaurar a posição do objeto no detector. Porém o que é bastante simples para as estrelas de calibração torna-se desafiador para os alvos científicos. Como o sinal das galáxias é muito fraco para ser claramente detectado em cada subtração dos *savesets*, a imagem precisou ser suavizada por uma função gaussiana, afim de eliminar o ruído de alta frequência espacial. Alguma estrutura de larga escala, fruto da emissão do próprio telescópio, ainda resta nas imagens, e normalmente seria removida com as diferentes posições de *nods*, mas neste caso precisamos remover com ainda um outro ajuste. Este procedimento foi aplicado em todas as imagens à exceção das imagens de NGC 2146, por conta da ausência de um núcleo claramente identificável.

As imagens reduzidas são apresentadas na figura 2.8. Vê-se que apenas a galáxia NGC 2146 apresenta uma estrutura estendida, enquanto as outras três fontes aparecem como não resolvidas. Também podemos notar que a presença ou não de estrutura estendida não é dependente do filtro utilizado. Ainda, dada a proximidade dos comprimentos de onda centrais de cada filtro, não notamos diferença marcante de fluxo em nenhuma das fontes.

### Artefatos nas imagens da CanariCam

Apesar do deslocamento aplicado aos *savesets* ainda permaneceram estruturas nas imagens das estrelas de calibração, na forma de anéis de difração. O formato destes últimos é característico de espelhos hexagonais, e ainda carrega uma outra componente: o fato de o espelho primário ser formado por um conjunto de espelhos menores. Assim, pequenas diferenças de fase na frente de onda advinda de cada “sub-espelho” podem gerar figuras de difração correspondente ao raio efetivo destes últimos, que é de 1,8 m.

Efeitos espúrios resultantes da geometria do espelho primário, e que movem-se em função do ângulo de posição do detector seriam trivialmente corrigidos, não fosse pelo complicador discutido na última seção. Como o centro das imagens não é bem reproduzido entre os *savesets*, também tem caráter aleatório a intensidade da componente azimutal da figura de difração. Contudo o sinal das franjas de difração é débil demais para ser corretamente identificado em cada *saveset*, e apenas o seu efeito combinado aparece com clareza.



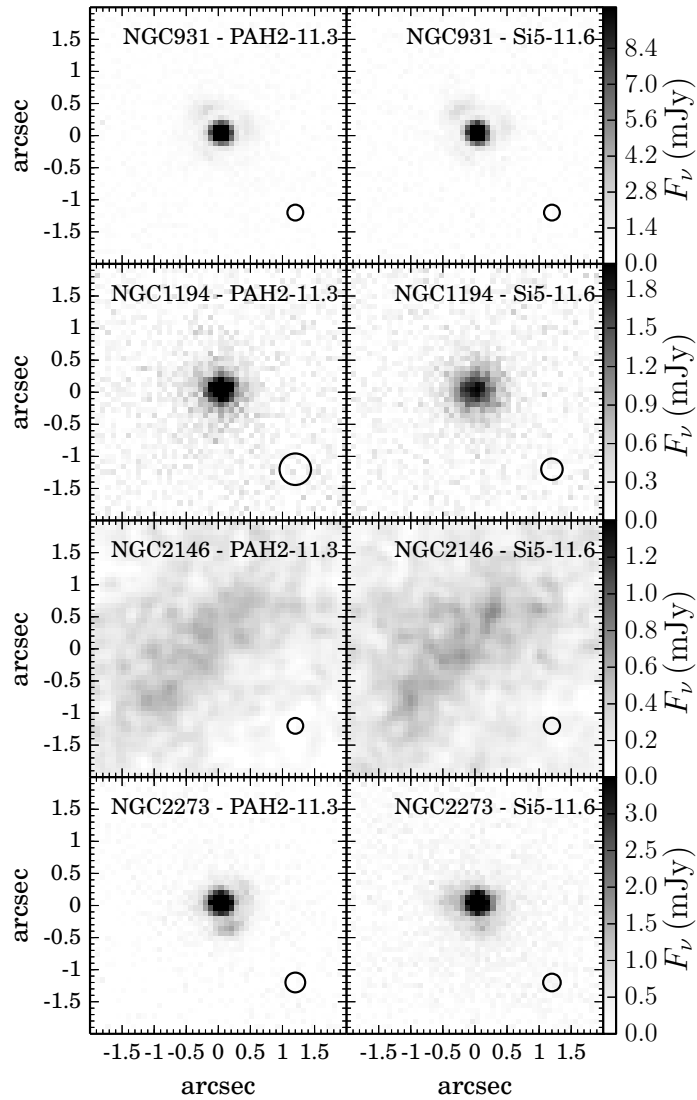


Figura 2.8: Imagens reduzidas obtidas com a CanariCam. As elipses em preto apresentadas no canto inferior direito de cada painel representam a meia altura da PSF de cada observação.

### 2.3.2 Imagens do VISIR

Em adição às imagens obtidas com a CanariCam também analisamos imagens de arquivo obtidas com o instrumento VISIR ligado ao UT3 do VLT. Como já mencionado, este instrumento e os filtros utilizados nas observações são suficientemente similares aos dados da CanariCam para propiciar uma análise homogênea.

Para esta subamostra foram selecionadas todas as galáxias observadas nos filtros PAH2 e PAH2\_2, mencionadas no atlas de AGNs locais observados em alta resolução no MIR compilado por Asmus et al. (2014).

## Redução

Todos os dados foram reduzidos por rotinas desenvolvidas pelo autor, incluindo o procedimento de centralização dos diferentes *savesets* antes de sua combinação. Repetir a redução dos dados foi uma escolha feita à época em que as imagens estavam disponíveis apenas como dados crus, porém hoje elas já estão disponíveis reduzidas na página pessoal de Daniel Asmus<sup>1</sup>. Não obstante, a precisão na determinação do fluxo sendo tão importante para este estudo, consideramos prudente repetir este procedimento de forma independente.

A calibração em fluxo se deu através de estrelas padrão espectrofotométricas observadas com menos de 2h de intervalo das exposições científicas. Para a maioria dos casos utilizamos a conversão de unidades instrumentais para densidade de fluxo dada nas tabelas de qualidade de dados providas pelo ESO. No caso das observações anteriores a Dezembro de 2005 estes dados não estavam disponíveis, e procedemos a redução das estrelas padrão.

Nas figuras 2.9 e 2.10 apresentamos todas as imagens reduzidas obtidas do atlas de Asmus et al. (2014) nos dois filtros.

## 2.4 Espectroscopia de campo integral com o GMOS

Para a galáxia em interação menor AM2306-721A, obtivemos espectroscopia de campo integral (IFS) com o instrumento GMOS, ligado ao telescópio Gemini Sul. Os dados pertencem ao programa de observação GS-2014B-Q-74, cujo o investigador principal foi José Andrés Hernández Jiménez.

A amostragem espacial na configuração utilizada é de  $0.1''$ , mas as observações estão limitadas pelo *seeing* da noite, que foi de aproximadamente  $1''$ . Sendo assim, toda a informação espacial está sobre amostrada por um fator de aproximadamente 10. O leitor deve manter em mente esta informação ao tentar interpretar estruturas nas imagens do cubo de dados.

A resolução em velocidade que obtivemos com o GMOS foi de  $\sim 43$  km/s. Este resultado advém da medida de dispersão sobre os espectros das lâmpadas de calibração, que em  $6683\text{\AA}$  tem uma FWHM de  $2.235\text{\AA}$ .

---

<sup>1</sup>Acessado em 8 de Junho de 2015: <http://dasmus.blogspot.de/search/label/data>

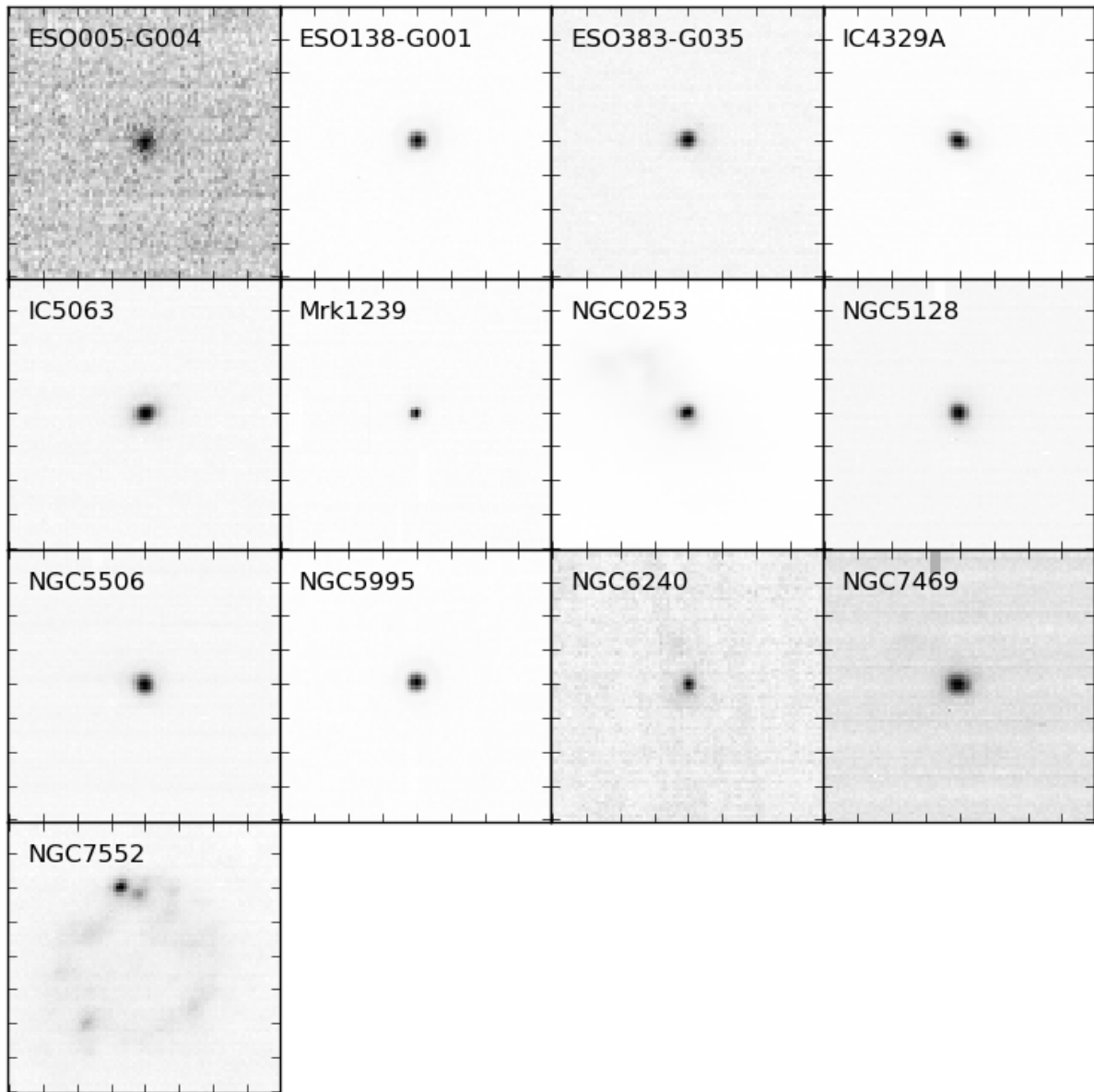


Figura 2.9: Imagens do VISIR no filtro PAH2

$$\sigma_0 = \frac{\text{FWHM}}{\lambda_0 2\sqrt{2\ln 2}} 2.998 \times 10^5 = 42.6 \text{ km/s}$$

No entanto, a incerteza na determinação do centro das linhas de emissão é consideravelmente menor do que este valor. Supondo que o perfil intrínseco das linhas de emissão pode ser representado por uma função gaussiana, Keel (1996) estimam o erro em velocidades como

$$\sigma = \frac{0.8\sigma_{\text{cont}}c}{I\lambda} \frac{\Delta\lambda^{1.5}}{d^{0.5}},$$

[

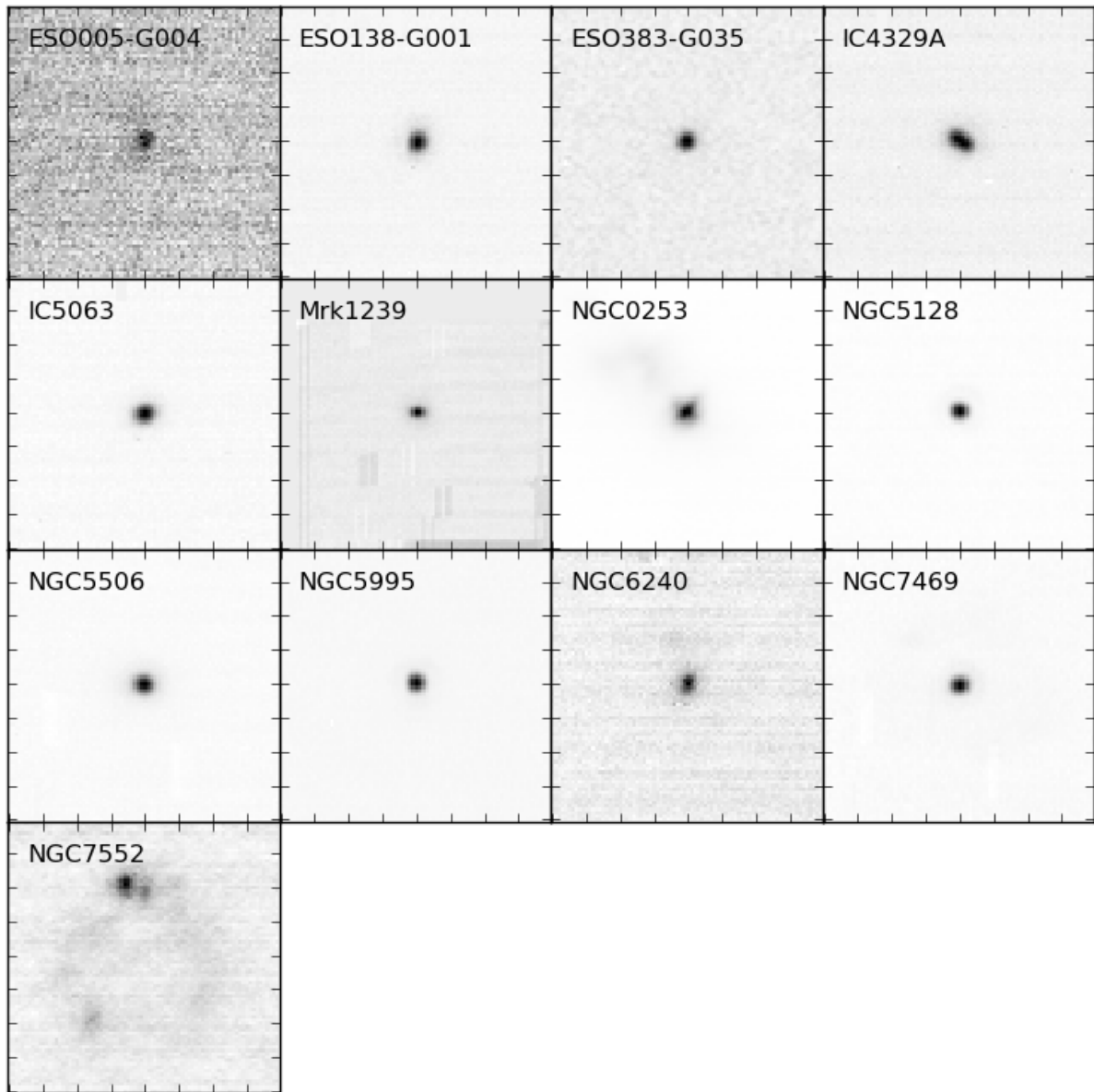


Figura 2.10: Imagens do VISIR no filtro PAH2.2

onde  $\sigma_{\text{cont}}$  é o desvio padrão das contagens do contínuo,  $I$  é a intensidade em contagens instrumentais da linha de emissão,  $d$  é a dispersão do espectrógrafo. No caso de nossas observações com o GMOS, a equação acima leva a  $\sigma \sim 8 \text{ km/s}$ .

Os dados foram tomados no modo de duas fendas, que privilegia um campo maior em detrimento da cobertura espectral, resultando em um campo de  $7'' \times 5''$ . A cobertura espectral destas observações, no sistema de referência local, vai de  $5690 \text{ \AA}$  a  $6950 \text{ \AA}$ , com a rede R400 e o filtro  $r$ . O poder resolutor da rede utilizada é de aproximadamente 2000.

Cada espectro do cubo de dados foi amostrado por uma fibra óptica que leva a radiação coletada no plano focal do telescópio para um elemento dispersor. O espectro é então

colimado e projetado sobre três CCDs, cada um com 4 conversores analógico-digitais distintos. Existe uma limitação física para a mínima distância entre os detectores que causa o aparecimento de uma falha nos espectros. Como cada espectro ocupa uma posição diferente no detector a falha “move-se” em função do comprimento de onda. É fácil ver este efeito sobre os espectros já extraídos na figura 2.11, onde cada linha representa um espectro, e cada coluna uma coordenada de comprimento de onda.

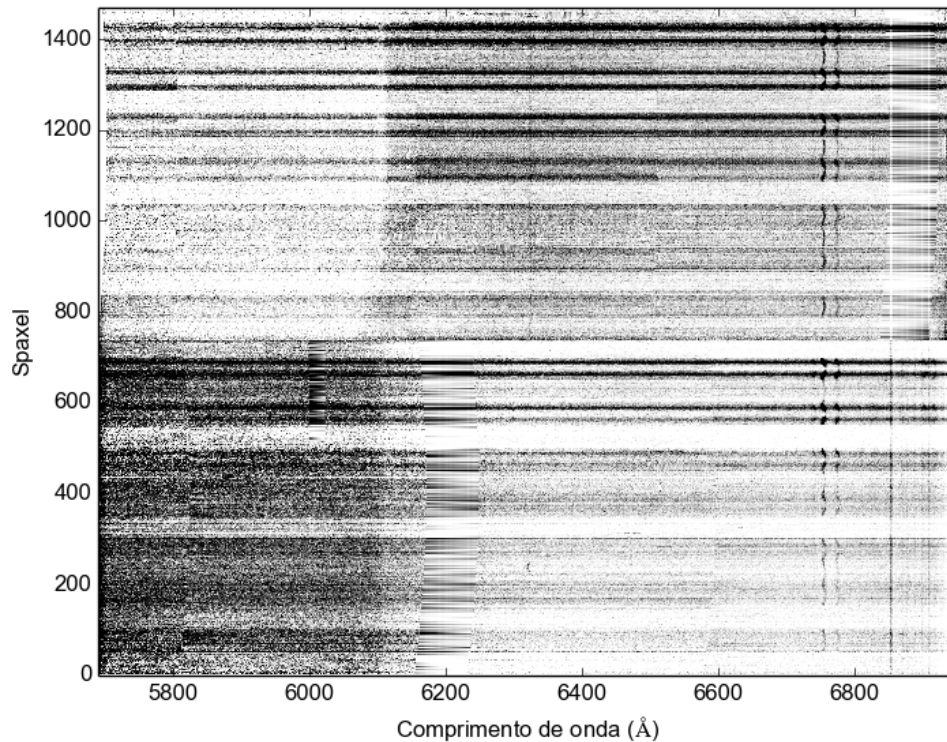


Figura 2.11: Espectros do cubo de dados de apenas uma das três exposições. As duas seções interpoladas, em  $6200\text{\AA}$  na metade inferior e  $6900\text{\AA}$  na metade superior, correspondem aos segmentos de espectro que foram projetados sobre a falha entre os detectores.

Também podemos ver na figura 2.11 a variação na sensibilidade de cada detector, mesmo após a calibração em fluxo. Este é um problema conhecido do instrumento, e até o momento não foi implementada e divulgada a correção.

### 2.4.1 Redução

A redução destes dados baseou-se no sub-pacote *gmos* do conjunto de tarefas *gemini* para o programa IRAF, versão 1.13 de 30 de Janeiro de 2015. Cada uma das três exposições que compõe o conjunto de observações desta galáxia teve 1100 segundos de exposição, o que naturalmente causa a captura de diversos raios cósmicos. Para a remoção destes foi empregada a rotina L.A.Cosmic (Dokkum, 2001), que busca por “degraus” na imagem

através de picos no seu Laplaciano; raios cósmicos tendem a ter limites muito mais agudos do que a resolução espacial do instrumento. Em se tratando de espectros o algoritmo possui uma opção para subtrair um ajuste dos dados antes de aplicar o Laplaciano, e aqui utilizamos um ajuste de polinômios de Legendre de ordem 9 na direção espectral e de ordem 3 na direção espacial. Os poucos raios cósmicos que restaram foram removidos após inspeção visual, e os espectros interpolados sobre os pixels afetados.

Nestas observações não foi solicitada a observação de uma estrela padrão fotométrica dedicada, sendo utilizada uma observação de um outro dia. Assim, a calibração absoluta em fluxo não é a mais confiável possível, dada a variação atmosférica entre as observações científicas e a estrela de calibração.

Como a intensidade do fluxo varia espacialmente, a relação sinal-ruído deve cair nas regiões mais distantes do núcleo da galáxia, como apresentado na figura 2.12. Porém também vemos na mesma figura um padrão “xadrez” de pixels que obviamente representam uma característica instrumental. No caso, este é o efeito do mapeamento das fibras para cada spaxel no cubo de dados, transformando as variações suaves de sensibilidade do detector em variações abruptas nos spaxels transformados.

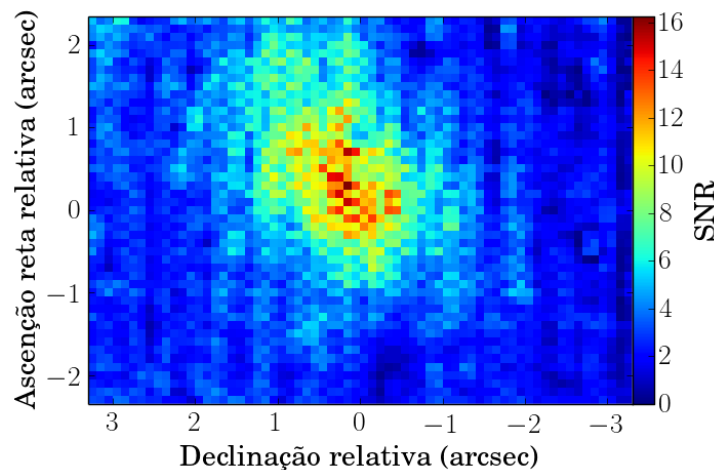


Figura 2.12: Razão sinal-ruído para cada um dos espectros obtidos com o GMOS. O ruído foi definido como o desvio padrão em relação a um pseudocontínuo polinomial entre 6300 e 6400Å.

Na figura 2.13 apresentamos a média do espectro em uma abertura de 3 spaxels de raio centrada no ponto de brilho mais intenso do contínuo do cubo de dados. Apesar de um débil contínuo estelar, veem-se claramente as linhas de emissão  $H\alpha$  ( $\lambda 6562.8\text{\AA}$ ),  $[N\ II]$  ( $\lambda\lambda 6548.04\text{\AA}$ ,  $6583.46\text{\AA}$ ) e  $[S\ II]$  ( $\lambda\lambda 6716.44\text{\AA}$ ,  $6730.82\text{\AA}$ ).

As duas imagens na figura 2.14 apresentam o nível de contínuo e a intensidade da

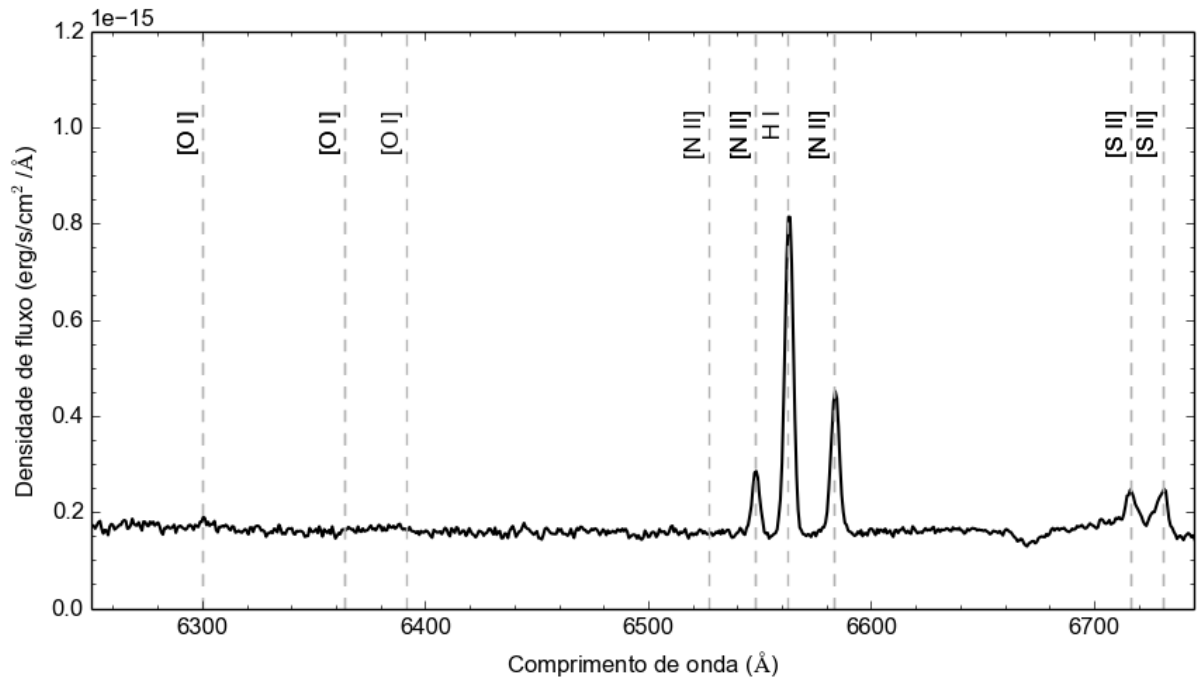


Figura 2.13: Espectro central da galáxia AM2306-721A. A densidade de fluxo apresentada aqui é o resultado da média em uma abertura de 3 spaxels centrada no pico do contínuo.

linha  $H\alpha$  no cubo de dados. Ambos dados serão tratados em detalhe no capítulo 5, e estão aqui apenas para ilustrar e contextualizar as observações. Comparando as duas imagens podemos ver que existe um desacordo entre o eixo maior fotométrico, com o ângulo de posição na imagem de  $H\alpha$  um pouco maior do que na imagem do contínuo. Ao mesmo tempo também se detectam estruturas que parecem braços espirais na imagem de  $H\alpha$  que estão ausentes na imagem do contínuo. Para ressaltar esta estrutura adicionamos contornos no nível de fluxo dos braços.

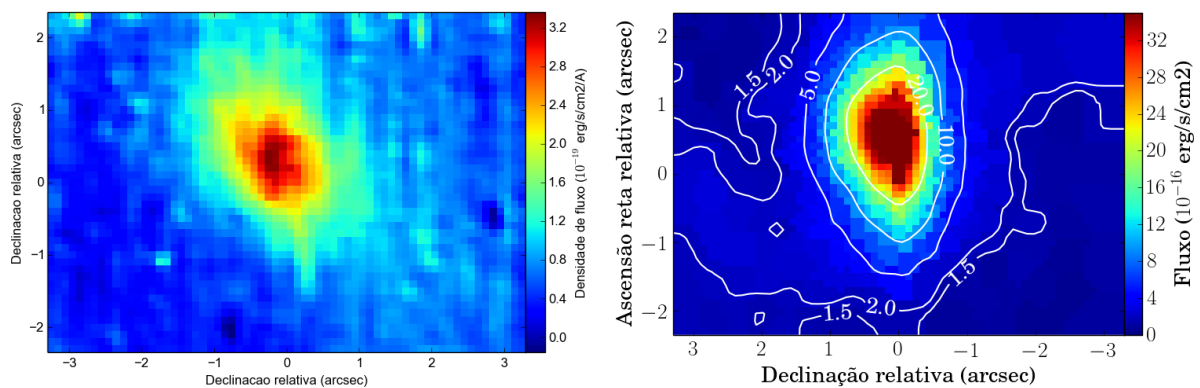


Figura 2.14: *esquerda*: Densidade de fluxo do contínuo tomado em  $6600\text{\AA}$  no sistema de referência terrestre ( $\sim 6400$  no sistema de referência da galáxia AM2306-721A). *direita*: Fluxo da linha  $H\alpha$  com os contornos evidenciando uma estrutura que se assemelha a braços espirais.

### 3 *Propriedades do toro de poeira em três AGNs*

Neste capítulo apresentamos a análise de espectros e imagens no MIR de duas galáxias com atividades nucleares contrastantes: a Sy2 NGC 1386 e a Sy1 NGC 7213, além do espectro nuclear de uma segunda galáxia Compton-thick, a Mrk 3. O objetivo é investigar as propriedades do possível toro de poeira que circunda o AGN, previsto pelo modelo unificado (Antonucci, 1993). Nossa discussão é baseada na interpretação de um toroide composto por nuvens pequenas em relação a este último, e de alta profundidade óptica (Pier e Krolik, 1993; Nenkova et al., 2002, 2008a).

**NGC 1386** É uma galáxia Sy2 (Weaver et al., 1991) cujo disco está altamente inclinado em relação ao plano do céu. A classificação morfológica pode ser encontrada como Sa ou S0 dependendo dos autores (Tully, 1988; Weaver et al., 1991; Vaucouleurs et al., 1964; Sandage, 1978). Dados de raios-X sugerem que esta galáxia é *Compton-thick*, com uma densidade de coluna  $N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$  (Maiolino et al., 1998). Estudos ópticos mostraram a presença de braços espirais e um desacoplamento entre o núcleo cinemático e o núcleo óptico (Weaver et al., 1991; Storchi-Bergmann et al., 1996; Rossa et al., 2000) que poderia ser interpretado como evidência adicional do obscurecimento do AGN. Formação estelar já foi detectada nos braços espirais (Weaver et al., 1991; Storchi-Bergmann et al., 1996) e também na região nuclear (La Massa et al., 2012).

**NGC 7213** é uma galáxia espiral Sa com núcleo Sy1, vista com o disco no plano do céu. As componentes largas das linhas espectrais  $\text{H}\alpha$  e  $\text{H}\beta$  motivam a classificação como Sy1, mas por outro lado linhas de baixo potencial de ionização como  $6300\text{\AA}[\text{OI}]$  são relativamente fortes (Filippenko e Halpern, 1984). Neste mesmo artigo os autores atribuem esta característica de baixa ionização a altas densidades eletrônicas ( $n_e \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) no gás ionizado. Storchi-Bergmann et al. (1996) identificaram emissão de  $\text{H}\alpha$  no núcleo e em um anel de regiões HII com um raio de  $20''$ , e também notaram uma alteração no perfil de  $\text{H}\alpha$  com relação as observações de Filippenko e Halpern (1984). Schnorr-Müller



et al. (2014) demonstram que o gás ionizado desta galáxia apresenta um movimento não circular na direção dos braços espirais, no sentido do núcleo galáctico. Observações em raios-X não apresentam reflexão Compton, levando a conclusão de que a linha Fe K $\alpha$  é produzida em um núcleo *Compton-thin* (Bianchi et al., 2003).

A Sy2 Mrk 3 também é classificada como *Compton-thick* pelo seu espectro em raios-X (Awaki et al., 2008), com a densidade de coluna estimada em  $1.1 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ . Esta galáxia apresenta uma região de linhas estreitas que se estende até cerca de  $2''$ , traçando uma peculiar forma de “S”, conforme relatado por Capetti et al. (1995). Miller e Goodrich (1990) e Tran (1995) relatam a presença de linhas de H alargadas no espectro polarizado de Mrk 3, além de um contínuo que se eleva na direção de menores comprimentos de onda, ao contrário do que se vê na luz integrada, demonstrando a presença de uma região de linhas largas (BLR) escondida.

### 3.1 Características espectrais de NGC 1386 e NGC 7213

A alta resolução espacial dos dados do telescópio Gemini permite sondar regiões a dezenas de parsecs do núcleo ativo. Nesta escala as estruturas associadas ao AGN dominam a luz emitida, como a absorção do silicato em  $9.7\mu\text{m}$ , provavelmente ligada ao toro de poeira que circunda o disco de acreção (Nenkova et al., 2002, 2008a, 2008b; Sales et al., 2011). Em regiões mais externas a assinatura do silicato tende a ser menos marcante, devido as intensas bandas de emissão de moléculas aromáticas.

Nas figuras 3.1 e 3.2 apresentamos o espectro nuclear e estendido de ambas as galáxias. A característica de baixa ionização da NGC 7213, já relatada em estudos ópticos, é revelada no MIR através da proeminente linha de [NeII] em  $12.7\mu\text{m}$  e a ausência da linha [SIV], espécies que implicam a presença de fótons de 21.56 eV e 34.83 eV respectivamente. No espectro nuclear desta galáxia também pode-se detectar a emissão do silicato, com o aumento do nível do contínuo a partir de  $9\mu\text{m}$ . A linha de baixa ionização  $12.8\mu\text{m}$  [NeII] está presente no espectro mas a linha de alta ionização de [SIV] está ausente. Uma vez que espectros ópticos da literatura desta galáxia mostram linhas de alto potencial de ionização como [OIII] e [NeV] (Filippenko e Halpern, 1984), a ausência da linha em  $10.5\mu\text{m}$  deve estar ligada a densidade eletrônica ao invés do parâmetro de ionização. De fato a transição que produz  $12.8\mu\text{m}$  [NeIV] tem uma densidade crítica de  $6.1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ , praticamente uma ordem de magnitude superior àquela que dá origem a linha  $10.5\mu\text{m}$

[SIV],  $3.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  (Martín-Hernández et al., 2002). Portanto concluímos que existem nuvens na região de linhas estreitas da NGC 7213 com densidade eletrônica na ordem de  $10^5 \text{ cm}^{-3}$ . Por outro lado também são detectadas linhas de baixa densidade crítica, como  $\lambda\lambda 6718\text{Å}, 6732\text{Å}$  [SII] ( $N_{cr} \sim 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Este resultado concorda com as conclusões de Filippenko e Halpern (1984), no sentido de que a região de linhas estreitas de NGC 7213 é formada por um complexo de nuvens com distintas densidades.

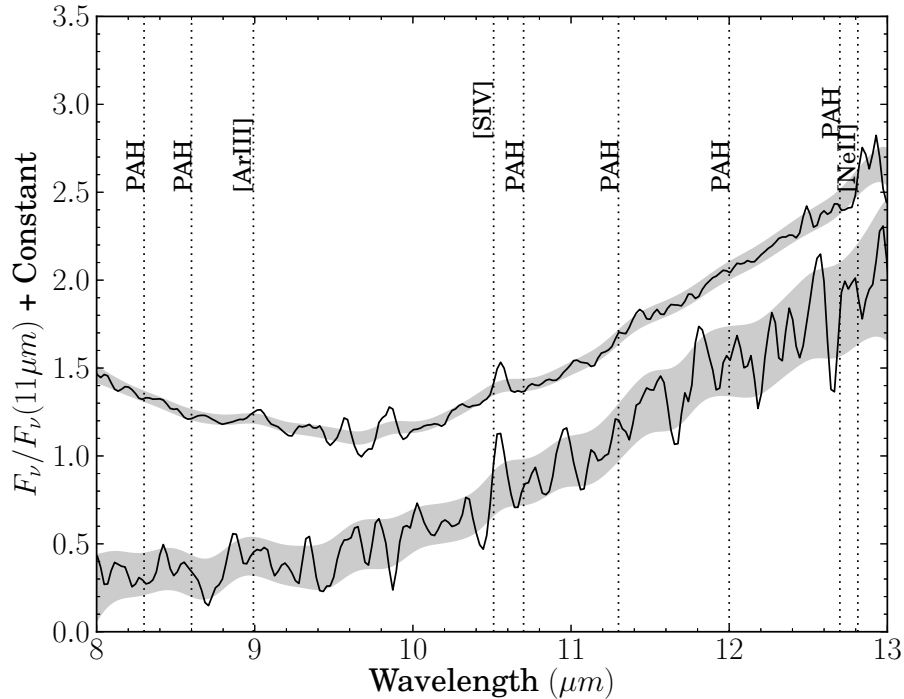


Figura 3.1: Espectros nucleares (*acima*) e estendido (*abaixo*) da galáxia NGC 1386 obtidos com o espectrógrafo T-ReCS. Regiões sombreadas são limitadas pelo ruído poissoniano convoluído por uma gaussiana com  $\sigma = 5\text{px}$ .

As principais características do espectro nuclear da NGC 1386 são a absorção do silicato em  $9.7\mu\text{m}$  e a linha [SIV] em  $10.5\mu\text{m}$ , enquanto que o espectro da galáxia hospedeira apresenta apenas um aumento do fluxo em direção a comprimentos de onda maiores devido a poeira interestelar. Assim como no espectro do Spitzer, a emissão do [NeII] em  $12.8\mu\text{m}$  é comparativamente fraca, e fica muito próxima da estimativa da incerteza neste caso. Entre os fatores que poderiam influenciar a baixa intensidade da linha do [NeII] destacamos dois: i) a densidade do meio pode estar próxima à densidade crítica do [SIV], aumentando sua emissividade; ii) um alto parâmetro de ionização pode levar a uma alta razão  $\text{Ne}^{++}/\text{Ne}^+$  entre as populações de espécies iônicas, o que pode ser confirmado pela alta emissividade da linha  $15.5\mu\text{m}$  [NeIII] nos espectros do Cassis.

Uma rasa depressão centrada na banda do silicato é visível no espectro nuclear de

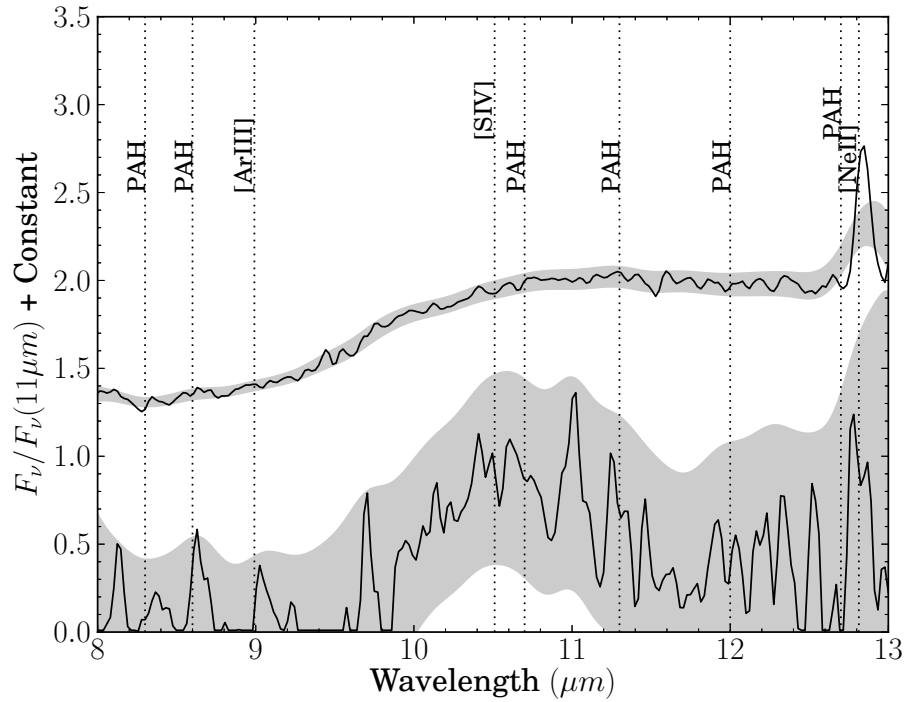


Figura 3.2: Análogo a figura 3.1, porém para a galáxia NGC 7213

NGC 1386, enquanto o espectro estendido é praticamente plano antes de  $10\mu\text{m}$ . Seguindo o método descrito por Spoon et al. (2007) medimos a intensidade de absorção do silicato ( $S_{\text{sil}}$ ) ajustando um contínuo linear à mediana dos fluxos dentro de janelas de  $1\mu\text{m}$  centradas em  $8.2\mu\text{m}$  e  $12.4\mu\text{m}$  (Mason et al., 2006) e tomando a razão entre o fluxo observado e o contínuo em  $9.7\mu\text{m}$ . Em símbolos

$$S_{\text{sil}} = \log \frac{f_{\text{obs}}(9.7\mu\text{m})}{f_{\text{cont}}(9.7\mu\text{m})}. \quad (3.1)$$

Para ilustrar a diferença no comportamento da banda do silicato nestas duas galáxias apresentamos na figura 3.3 uma representação gráfica do procedimento descrito acima para obter  $S_{\text{sil}}$ . Obtivemos  $S_{\text{sil}} = -0.69^{+0.19}_{-0.23}$  e  $S_{\text{sil}} = -0.42^{+0.30}_{-0.44}$  para a extração central e exterior de NGC 1386 respectivamente. Estes valores concordam com resultados publicados de Wu et al. (2009) para uma abertura de  $20.4'' \times 15.3''$ . A única feição em emissão detectada neste espectro é a linha  $10.5\mu\text{m}$  [SIV].

Aproximadamente em  $9\mu\text{m}$  no espectro nuclear de NGC 7213 começa a ser perceptível um aumento no nível do contínuo causado pela emissão dos grãos de silicato, com uma estimativa de  $S_{\text{sil}} = 0.15^{+0.14}_{-0.16}$ . Devido a baixa razão sinal ruído (SNR) da emissão estendida nesta galáxia abdicamos de qualquer análise sobre o espectro estendido.

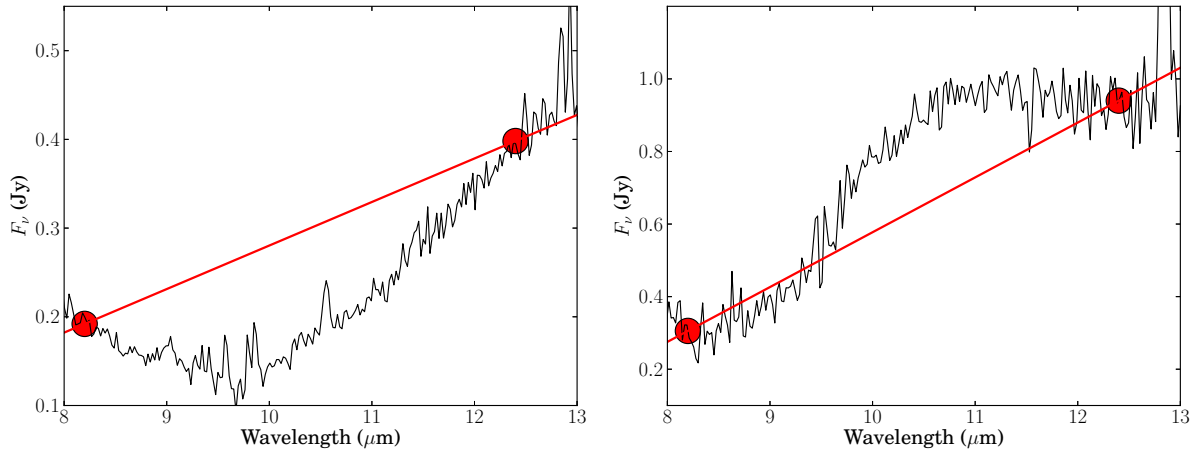


Figura 3.3: Espectros nucleares das galáxias NGC 1386 (*esquerda*) e NGC 7213 (*direita*) mostrando o pseudocontínuo utilizado para avaliar a absorção/emissão na banda de silicato centrada em  $9.7\mu\text{m}$ . Os pontos vermelhos marcam as posições de “ancoragem” do pseudocontínuo.

### 3.2 Espectro nuclear: evidências de um toro de poeira?

Os modelos de toro CLUMPY<sup>1</sup> (Nenkova et al., 2002, 2008a) foram utilizados para estudar o contínuo da emissão do núcleo. Como em Sales et al. (2011) as linhas de emissão e a região de maior absorção telúrica foram mascaradas e o espectro resultante foi comparado com distribuições espectrais de energia (SED) teóricas. Estas SED foram criadas supondo um toro formado por nuvens de poeira, com os seguintes parâmetros: (*i*) o número de nuvens,  $N_0$  ao longo de um raio equatorial; (*ii*) a profundidade óptica visual de cada nuvem,  $\tau_\nu$ ; (*iii*) a extensão radial das nuvens,  $Y = R_0/R_d$ , onde  $R_0$  e  $R_d$  são os raios externo e interno respectivamente; (*iv*) a função que descreve a distribuição radial das nuvens como uma lei de potência  $\propto r^{-q}$ ; (*v*) a distribuição de nuvens na direção normal ao plano do toro, definida pelo parâmetro  $\sigma$  na expressão  $N_0 \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right)$ , (*vi*) o ângulo da linha de visada com relação ao plano do toro  $i$ .

Os parâmetros do melhor ajuste para o espectros nuclear foram obtidos através da código de inferência BAYESCLUMPY (Ramos e Almeida, 2009). Usando um método de Cadeias de Markov o código investiga um espaço de parâmetros definido pelos 13 primeiros autovetores, que por sua vez são o resultados da análise de componente principal (PCA) de uma grade de modelos com mais de  $10^6$  SEDs. Uma rede neural artificial avalia a distribuição posterior de cada um dos parâmetros tendo em conta as observações. A única informação a priori dada ao BAYESCLUMPY neste estudo foi a limitação de  $i > 45^\circ$  para a

<sup>1</sup>Os modelos estão disponíveis na rede no seguinte endereço: <http://www.pa.uky.edu/clumpy/>

Sy2 e  $i < 45^\circ$  para a Sy1. As soluções encontradas mantiveram-se estáveis em 10 execuções do algoritmo.

Os histogramas de distribuição da probabilidade a posteriori para cada parâmetro estão nas figuras 3.4 e 3.5. Nestas figuras as probabilidades são normalizadas ao máximo da distribuição de probabilidade. As linhas sólidas marcam a mediana da distribuição enquanto as tracejadas marcam a largura de  $1\sigma$  ou 68% de confiança. A linha pontilhada marca os parâmetros que em conjunto atingem o máximo de probabilidade a posteriori (MAP), ou o melhor ajuste aos dados, que é equivalente a uma minimização simples da função  $\chi^2$ .

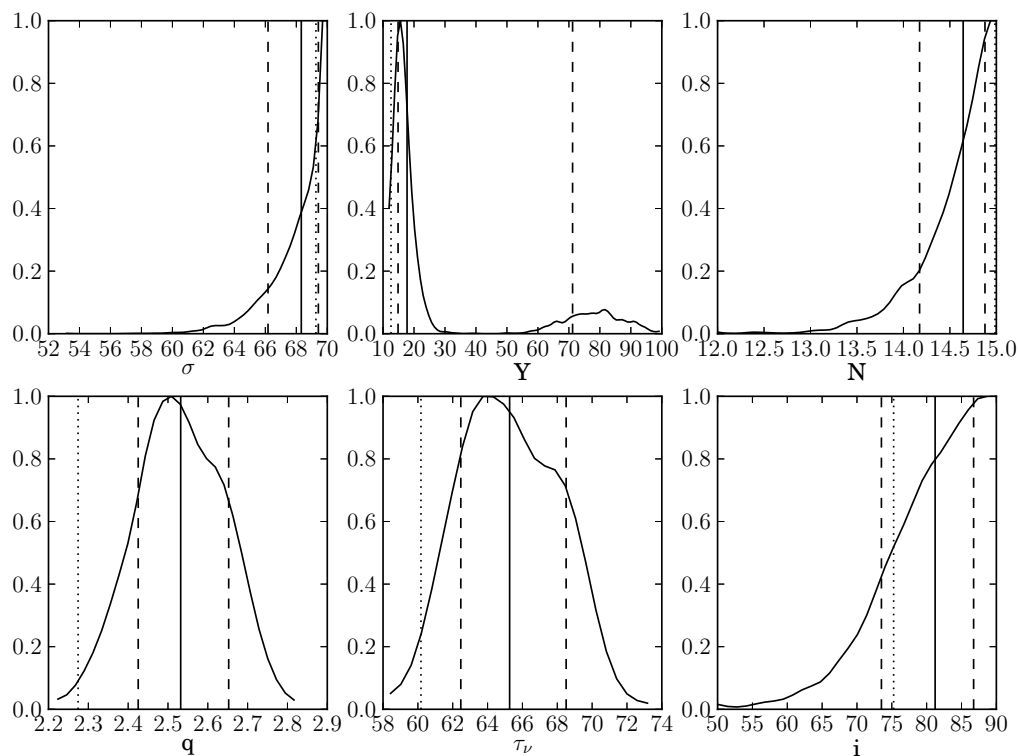


Figura 3.4: Histogramas de probabilidade a posteriori para cada um dos parâmetros ajustados pelo BayesCLUMPY para a galáxia NGC 1386. A linha sólida representa a mediana da distribuição e as linhas tracejadas o intervalos de 68% de confiança. A linha pontilhada marca os parâmetros de máxima probabilidade a posteriori, ou o melhor ajuste aos dados.

Os espectros teóricos que resultam dos ajustes estão nas figuras 3.6 e 3.7. Fica claro que ambos os comportamentos são bem representados pelos modelos. Faixas sem pontos empíricos entre 9 e  $10\mu\text{m}$ , bem como seções menores em outras regiões, foram mascaradas para prevenir a interferência de absorções atmosféricas e linhas de emissão. Nas extremidades do espectro observado os pontos tendem a se distanciar dos modelos, porém este

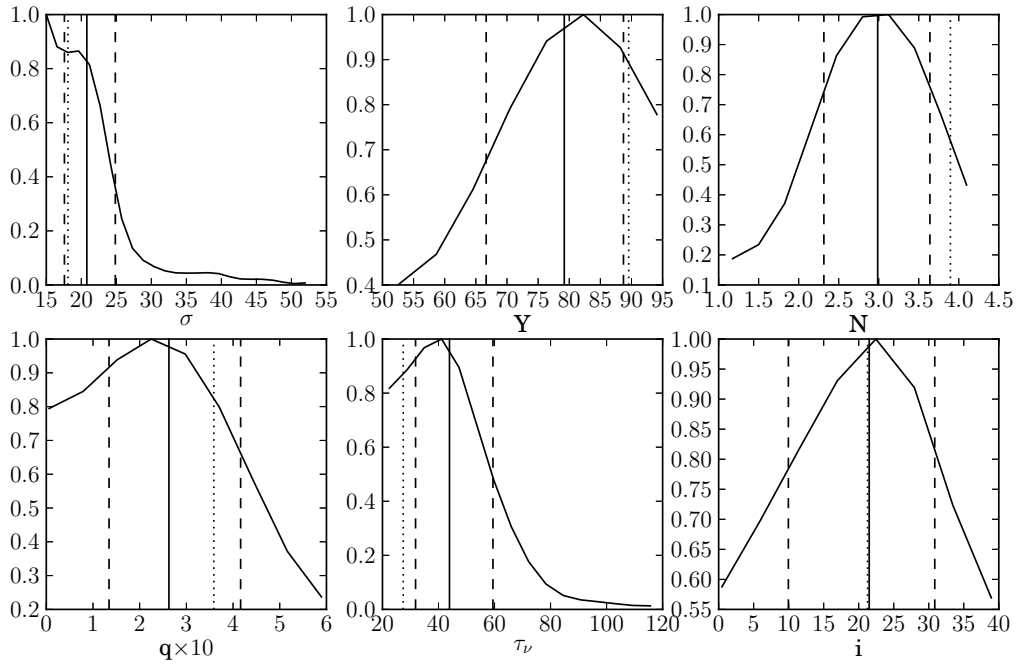


Figura 3.5: Igual a figura 3.4 porém para a galáxia NGC 7213.

Tabela 3.1: Parâmetros do melhor ajuste dos modelos CLUMPY.

Parâmetro	Valor com 68% de confiança	
	NGC 1386 (Sy2)	NGC 7213 (Sy1)
$\sigma$	$68^{+1}_{-2}$	$21^{+4}_{-3}$
$Y$	$18^{+53}_{-3}$	$79^{+10}_{-13}$
$N$	$14.6^{+0.2}_{-0.5}$	$3.0^{+0.7}_{-0.7}$
$q$	$2.5^{+0.1}_{-0.1}$	$0.3^{+0.2}_{-0.1}$
$\tau$	$65^{+3}_{-3}$	$44^{+16}_{-12}$
$i$	$81^{+6}_{-8}$	$21^{+9}_{-12}$

efeito está muito provavelmente associado a má representação da função de sensibilidade nas “bordas” do filtro que seleciona a ordem de difração.

Ajustar os modelos CLUMPY ao espectro é um problema intrinsecamente degenerado, ou seja, mudanças em um conjunto de parâmetros podem produzir os mesmos efeitos que mudanças em outro conjunto. Por exemplo, o número de nuvens e a profundidade óptica de uma única nuvem podem ambos dar conta do avermelhamento do espectro. A degenerescência é especialmente notável quando se lida com faixas espectrais tão estreitas como as das observações de superfície do MIR. Por outro lado, esta janela espectral abrange uma das feições espectrais de maior importância atribuídas ao toro, a banda de absorção de silicato centrada em  $9.7\mu\text{m}$ .

Nas figuras 3.8 e 3.9 apresentamos os mapas da probabilidade *a posteriori* para cada

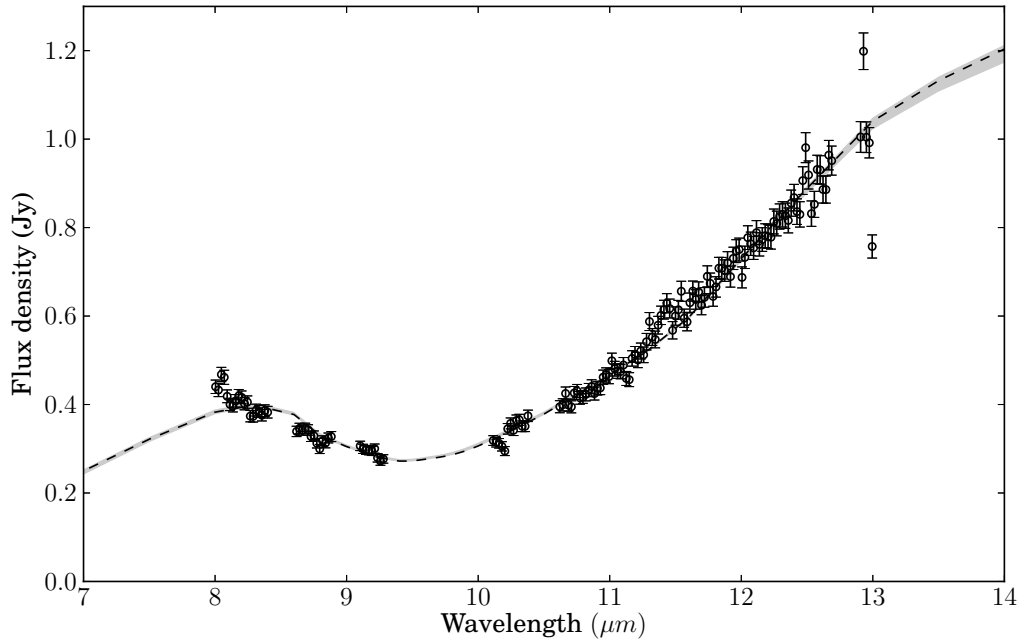


Figura 3.6: Ajuste dos modelos de toro ao espectro nuclear da NGC 1386. Círculos vazados representam as observações, a região sombreada indica o intervalo de 68% de confiabilidade a partir do modelo com os parâmetros mais prováveis, e a linha tracejada indica o modelo que melhor se ajusta aos dados.

par de parâmetros dos modelos CLUMPY, ajustados as galáxias NGC 1386 e NGC 7213 respectivamente. Podemos ver que para a galáxia Seyfert 2 NGC 1386 o parâmetro  $\sigma$ , que determina a distribuição de nuvens ao longo do ângulo de latitude, está sempre tendendo ao limite superior permitido pelos modelos, independentemente dos outros parâmetros. O parâmetro  $Y$  apresenta bimodalidade, com seus maiores valores tendo uma leve preferência por valores altos dos parâmetros  $q$  e  $\tau_V$ , significando que uma nuvem radialmente extensa também precisa ter um decaimento mais rápido em densidade na direção radial, e maior profundidade óptica de cada nuvem, para bem representar o espectro observado. Já entre os parâmetros  $q$  e  $\tau_V$ , e  $q$  e  $i$ , identifica-se uma correlação, indicando a degenerescência do problema, ainda que os valores de  $\tau_V$  e  $q$  estejam limitados a uma pequena fração das possibilidades.

No caso da galáxia Seyfert 1 NGC 7213 (fig. 3.9) vemos que o parâmetro  $\sigma$  está restrito a valores próximos do limite inferior do que é permitido pelos modelos, tal como  $\tau_V$ . O ângulo da linha de visada  $i$  encontra-se pouco definido, especialmente com relação aos parâmetros  $\sigma$  e  $\tau_V$ , onde a curva que marca  $1\sigma$  abaixo da máxima probabilidade se estende por quase todos os valores possíveis para  $i$ . Neste ajuste os únicos parâmetros que se encontram correlacionados, ainda que muito levemente, são  $N$  e  $Y$ , com valores maiores

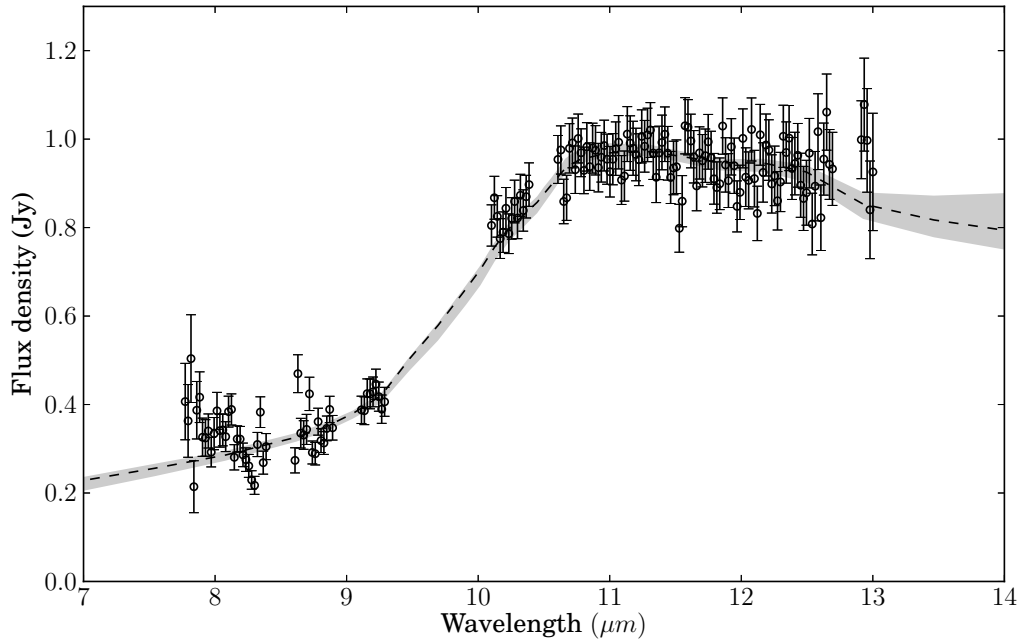


Figura 3.7: Análogo a figura 3.6 porém para a galáxia NGC 7213.

para o número de nuvens acompanhando toroides mais extensos radialmente.

Os resultados obtidos estão em acordo com a figura geral do modelo unificado, apenas no sentido de que a inclinação tende a valores baixos para a Sy1 NGC 7213 e valores altos para a Sy2 NGC 1386. É importante ressaltar que a imposição de  $i < 45^\circ$  para NGC 7213 não ocasionou um acúmulo de probabilidade próximo a este limite, como seria de se esperar caso as soluções tendessem a inclinações próximas ao plano do toro. Ao contrário, o histograma da distribuição de probabilidade para a inclinação (figura 3.5) demonstra claramente que esta primeira se anula antes de encontrar o limite de  $45^\circ$ . O mesmo não acontece com a NGC 1386 (figura 3.4), onde podemos ver que a probabilidade sempre é maior para maiores valores de  $i$ . Interessantemente a inclinação encontrada para o toro da NGC 1386 coincide com as estimativas de inclinação para o anel de formação estelar e para o disco do galáxia. Isto pode ser uma evidência de que a galáxia hospedeira está influenciando o ajuste dos modelos, principalmente quando o ajuste é tão dependente da absorção do silicato.

Baseado-nos nos parâmetros mais prováveis, listados na tabela 3.1, podemos deduzir o número de nuvens na linha de visada  $N_{\text{LOS}}$ . Nos modelos CLUMPY a distribuição vertical de nuvens leva a seguinte expressão

$$N_{\text{LOS}} = N \exp\left(-\frac{(90-i)^2}{\sigma^2}\right), \quad (3.2)$$



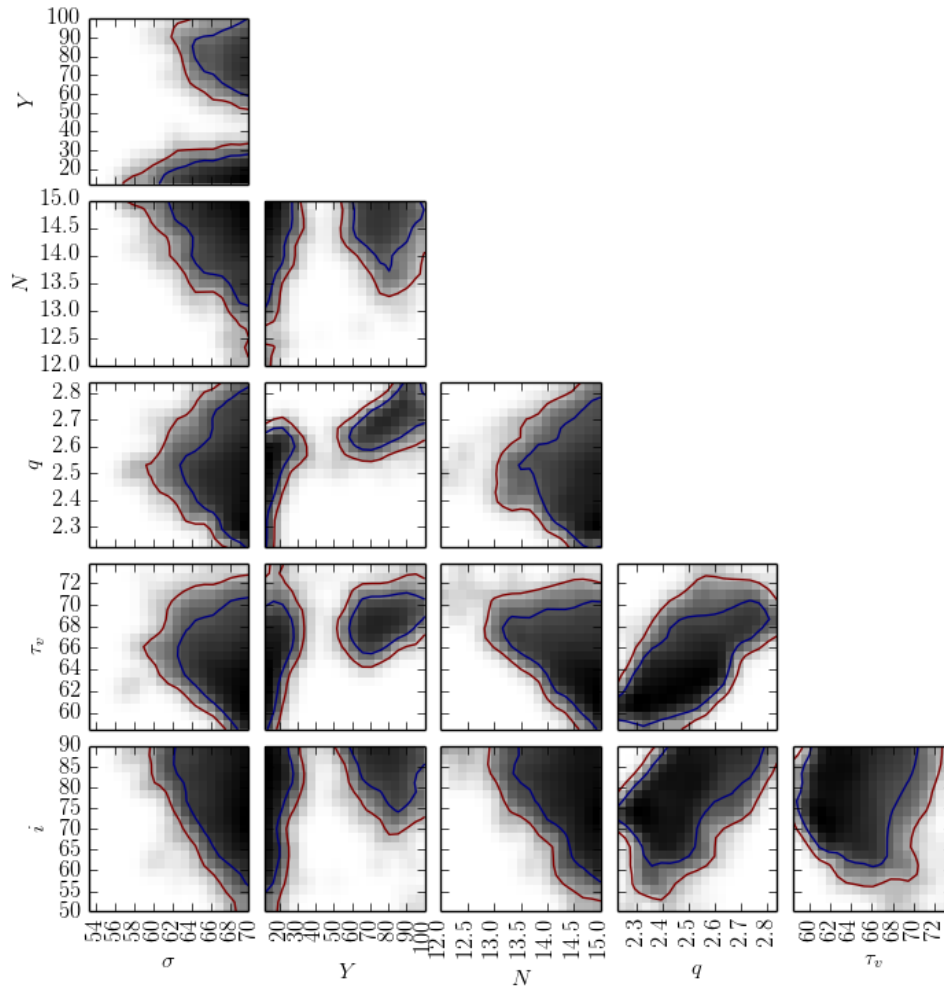


Figura 3.8: Mapas da probabilidade a posteriori para cada par de parâmetros dos modelos CLUMPY, para a galáxia NGC 1386. A escala de tons de cinza representa a probabilidade de cada combinação, com os tons mais escuros indicando maior probabilidade. As curvas azul e vermelha indicam os níveis de  $1\sigma$  e  $2\sigma$  respectivamente.

logo  $N_{\text{LOS}} = 14.4$  para NGC 1386 e  $N_{\text{LOS}} = 5.8 \times 10^{-5}$  para NGC 7213, que basicamente significa que não existem nuvens obscurecendo a última. Adotando a relação  $N_{\text{H}} = 1.086\tau_{\text{V}} \times 1.9 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  (Tielens, 2005) para densidade coluna de cada nuvem, concluímos que a linha de visada para o núcleo de NGC 1386 possui  $N_{\text{H}} = 2.0_{-1.6}^{+1.2} \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ .

### 3.3 Extensão para a galáxia Mrk 3

Durante a execução deste trabalho a mesma metodologia aplicada ao estudo do toro das galáxias NGC 1386 e NGC 7213 foi empregada para o estudo da galáxia Mrk 3. Esta análise, em colaboração com Miriani Pastoriza, Rogério Riffel, Dinalva A. Sales e Claudia Winge, tornou-se parte integrante do artigo Sales et al. (2014). Os espectros utilizados

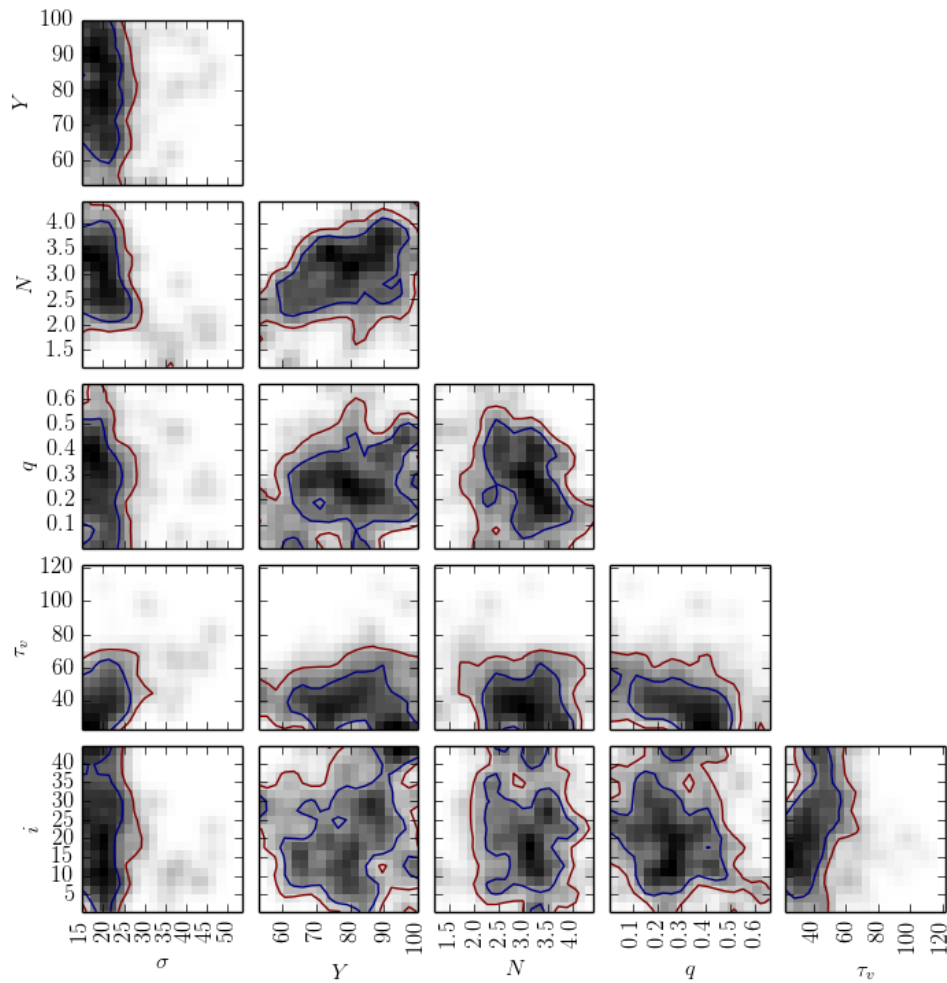


Figura 3.9: Mapas da probabilidade a posteriori para cada par de parâmetros dos modelos CLUMPY, para a galáxia NGC 7213. A escala de tons de cinza representa a probabilidade de cada combinação, com os tons mais escuros indicando maior probabilidade. As curvas azul e vermelha indicam os níveis de  $1\sigma$  e  $2\sigma$  respectivamente.

neste trabalho foram tomados com o instrumento Michelle no telescópio Gemini Norte (programa GN-2009B-Q-61, PI: Miriani Pastoriza). A redução e extração foi realizada por Dinalva Sales. Este instrumento é muito semelhante ao T-ReCS tanto em resolução quanto em cobertura espectral.

Como no caso das duas galáxias observadas com o T-ReCS, a Mrk 3 também apresenta um espectro com perfil espacial quase estelar. Sendo assim, o mesmo raciocínio discutido na seção 2.2 se aplica para tratar o espectro nuclear e estendido desta galáxia. Apresentamos na figura 3.10 o espectro nuclear da galáxia Mrk 3. As linhas iônicas [SIV] e [NeII] são claramente visíveis, assim como a depressão provocada pelo silicato. Neste espectro a região entre  $9.2\mu\text{m}$  e  $10\mu\text{m}$ , dominada pela absorção telúrica, foi mascarada. Como seria de se esperar de uma fonte *Compton-thick* este espectro se assemelha bastante ao da galáxia

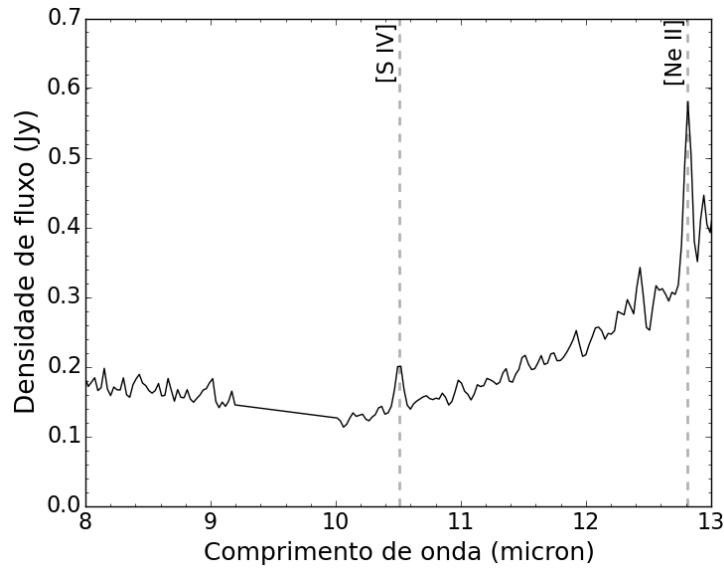


Figura 3.10: Espectro nuclear da galáxia Mrk 3.

NGC 1386, inclusive na intensidade de absorção de silicato com  $S_{\text{sil}} = -0.52 \pm 0.21$ .

Para esta galáxia realizamos duas rodadas de ajustes com o programa BAYESCLUMPY: uma com o ângulo  $i$ , entre o plano do toro e a linha de visada, podendo variar entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , e outra com a linha de visada próxima ao plano, limitada por  $i > 45^\circ$ . Os histogramas de probabilidade a posteriori são apresentados nas figuras 3.11 e 3.12 para  $0^\circ < i < 90^\circ$  e  $i > 45^\circ$  respectivamente.

Os resultados numéricos para as duas rodadas de ajustes são apresentados na tabela 3.2, juntamente com o intervalo de 68% de confiabilidade. Nestes ajustes os parâmetros  $N_0$  e  $i$ , que dão respectivamente o número de nuvens em uma linha radial no equador e o ângulo entre a linha de visada e a reta normal ao plano do toro, se compensam dependendo da restrição imposta a  $i$ . Quando deixamos  $i$  livre, vemos que os modelos mais prováveis tem pequenos ângulos e tendem para um  $N_0$  também pequeno. Contudo os dois apresentam certa bimodalidade, com ângulos próximos de  $60^\circ$  constituindo um foco de probabilidade, juntamente com  $N_0 \sim 12$ . Já na rodada em que  $i > 45^\circ$ , vemos pouca variação na distribuição posterior dos ângulos, porém a probabilidade para os maiores valores de  $N_0$  cai, definindo uma clara preferência por  $N_0 \sim 6$ .

O restante dos parâmetros varia comparativamente pouco entre as dois tipos de ajustes, com exceção da profundidade óptica individual das nuvens  $\tau_V$ . Para este parâmetro temos, como o esperado, uma diminuição do valor mais provável quando limitamos o ângulo da linha de visada a pequenas distâncias do plano do toro. Ressaltamos que este é o único parâmetro além da inclinação que sofre uma alteração maior do que seu intervalo

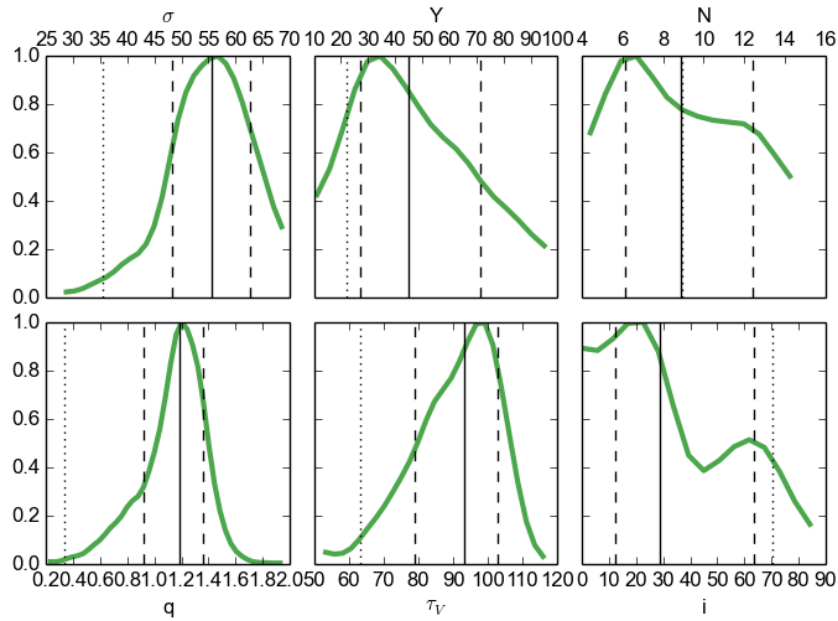


Figura 3.11: Histograma da distribuição de probabilidade para cada um dos seis parâmetros que definem os modelos de toro. Neste ajuste a inclinação do plano do disco com respeito a linha de visada foi deixada livre.

Tabela 3.2: Parâmetros do ajuste de toro para Mrk 3

Parâmetro	$0^\circ < i < 90^\circ$	$i > 45^\circ$
$\sigma$	$56^{+7}_{-7}$	$50^{+11}_{-15}$
Y	$45^{+27}_{-18}$	$38^{+25}_{-13}$
$N_0$	$9^{+4}_{-3}$	$6^{+2}_{-1}$
q	$1.2^{+0.2}_{-0.3}$	$0.9^{+0.3}_{-0.5}$
$\tau_V$	$93^{+10}_{-14}$	$77^{+10}_{-13}$
i	$29^{+35}_{-16}$	$66^{+13}_{-13}$

de 68% de confiabilidade entre as duas rodadas. Entretanto, esta diferença é suficiente para demonstrar que os modelos não são capazes de discriminar entre  $i$  e  $\tau_V$  em um ajuste com ambos livres.

Apresentamos nas figuras 3.13 os espectros resultantes dos ajustes de modelos de toro, comparando-os com as observações. Apesar das diferenças nos parâmetros mais prováveis, ambos espectros representam bem as observações, com os desvios mais notáveis concentrando-se nas extremidades do espectro.

Seguindo a mesma metodologia discutida acima, calculamos os valores de densidade de coluna na linha de visada  $N_H$  para a galáxia Mrk 3 com base nos dois ajustes. Para o primeiro ajuste, com  $0^\circ < i < 90^\circ$  temos  $N_H = 6.4^{+21.3}_{-2.7} \times 10^{23}$ . Já para o ajuste com  $i > 45^\circ$  temos  $N_H = 9.5^{+4.9}_{-7.1} \times 10^{23}$ . Ambos os valores concordam com  $N_H = 1.1 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$

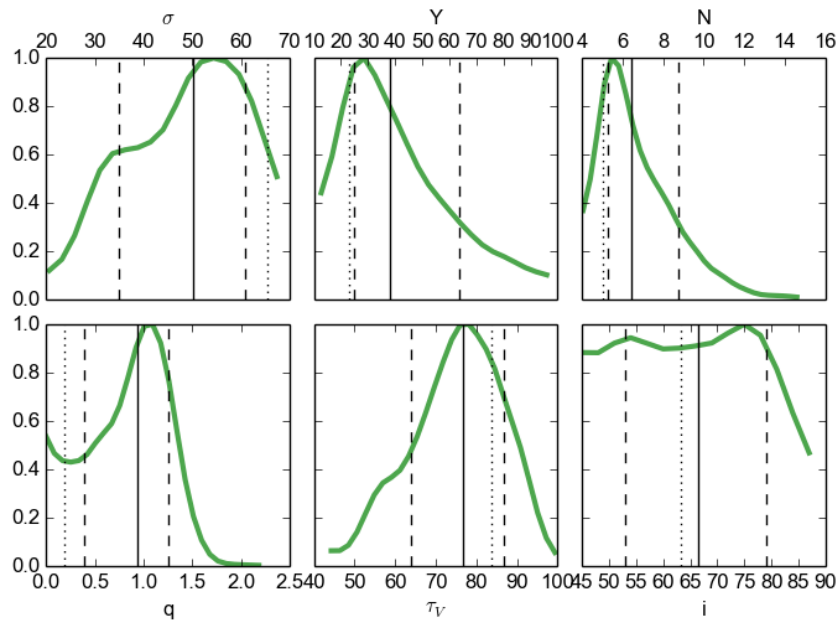


Figura 3.12: Histograma da distribuição de probabilidade para cada um dos seis parâmetros que definem os modelos de toro. Neste ajuste a inclinação do plano do disco com respeito a linha de visada foi limitada a  $45^\circ$ .

estimado por Awaki et al. (2009) utilizando observações em raios-X.

### 3.4 Discussão

Para as três galáxias, os valores medidos para a intensidade do silicato ( $S_{\text{sil}} > -1$ ), e a ausência de emissão de PAH concordam com a classificação de Spoon et al. (2007) para galáxias Seyfert. Sendo que estamos lidando com espectros nucleares, e como as duas galáxias de alto obscurecimento da fonte central, as *Compton-thick* NGC 1386 e Mrk 3, apresentam  $S_{\text{sil}} > -0.7$ , podemos concluir que dificilmente valores superiores de  $S_{\text{sil}}$  possam ser produzidos pelo toroide que circunda o AGN. Esta interpretação se alinha com outros trabalhos que atribuem valores muito baixos de  $S_{\text{sil}}$  a influência de faixas de poeira da galáxia hospedeira (González-Martín et al., 2013).

Além das diferentes inclinações retornadas pelos ajustes para galáxias de tipos Sy1 e Sy2, ou parcialmente impostas no caso das galáxias NGC 1386 e NGC 7213, são significativas também as diferenças na geometria do toro. Para facilitar a visualização dos diferentes modelos apresentamos na figura 3.14 ilustrações da densidade de nuvens projetada da direção da linha de visada. Nestas representações a densidade de nuvens aparece como uma distribuição contínua, e não deve ser confundida com um modelo de distribuição contínua de matéria. A escala de intensidade representa apenas a densidade relativa

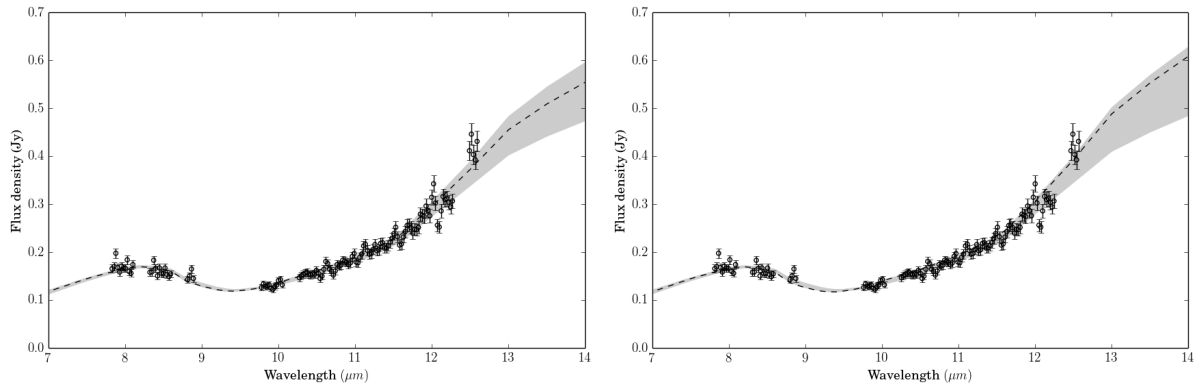


Figura 3.13: Ajuste dos modelos de toro ao espectro central da galáxia Mrk 3, com o ângulo do plano do toro livre em relação a linha de visada *esquerda* e com o ângulo limitado a  $45^\circ$  do equador *direita*.

de nuvens, tendo sido otimizada para o melhor contraste em cada painel. Na figura 3.14, e no restante desta discussão, adotaremos para Mrk 3 os parâmetros do ajuste com  $i > 45^\circ$ .

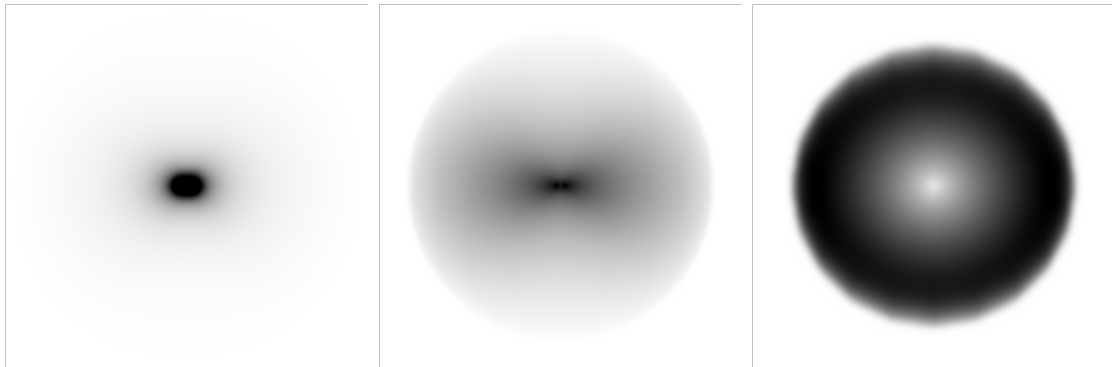


Figura 3.14: Representações da densidade de nuvens, projetada na direção da linha visada para NGC 1386, Mrk 3 e NGC 7213 (*da esquerda para a direita*). A escala de cinza é otimizada em cada painel para gerar maior contraste, e enfatizar as diferentes distribuições, em detrimento de uma comparação absoluta de densidades. Os valores utilizados para produzir a imagem da Mrk 3 são do ajuste com inclinação limitada.

Para a galáxia NGC 7213 os modelos sugerem um número muito menor de nuvens ( $N_0 = 3$ ), e uma distribuição vertical muito mais concentrada no equador ( $\sigma = 21$ ). O expoente  $q$ , que parametriza a distribuição radial, também é significativamente menor do que para as duas galáxias Sy2. Associadas a linha de visada quase polar, estas características levam a uma visão praticamente desimpedida do núcleo, com uma probabilidade muito baixa de obstrução pelas nuvens do toroide. Ao mesmo tempo, as regiões internas deste último ficam expostas, o que leva a emissão do silicato.

As duas galáxias Sy2 apresentam distribuições radiais muito mais concentradas, mas ainda assim distintas, com  $q = 2.5$  para NGC 1386 e  $q = 0.9$  para a Mrk 3, e uma distribuição vertical mais estendida. Ambos fatores contribuem para que até em ângulos

relativamente afastados do equador, o espectro apresenta o silicato em absorção, já que a linha de visada para a porção iluminada do toroide estaria obstruída.

Nossos resultados para estas três galáxias sugerem que o efeito da orientação do plano do toro de poeira não é o único responsável por diferenciar entre os núcleos Sy1 e Sy2, pelo menos quando os núcleos Sy2 são também *Compton-thick*. Outros autores, empregando metodologia similar, apontam que os parâmetros mais divergentes entre as diferentes classes de atividade nuclear são  $N_0$ ,  $\sigma$  e  $Y$ , também argumentando em favor da menor relevância da inclinação (Ramos Almeida et al., 2011). Concluimos portanto que os toroïdes nas galáxias observadas são intrinsecamente distintos, o que poderia ser ocasionando por diferenças intrínsecas no processo de crescimento do próprio AGN.

## 4 *Formação estelar através da emissão no MIR*

Neste capítulo abordarei os resultados para diferentes análises de formação estelar em galáxias, baseada na emissão de espécies iônicas e moléculas aromáticas, através de imagens e espectros da região do infravermelho médio. Para duas galáxias analisamos dados espectrais e imagens de baixa do telescópio espacial Spitzer, para estudar a formação estelar em grande escala. Na segunda parte deste capítulo discutirei a formação estelar nuclear em escalas de centenas de parsecs, através de imagens de alta resolução obtidas a partir de telescópios em terra. O objetivo desta segunda parte é buscar por correlações entre a formação de estrelas na região nuclear, e o buraco negro super massivo.

### 4.1 Amostra

A primeira parte deste capítulo se dedica ao estudo da formação estelar em duas das galáxias que tiveram o toro de poeira discutido no capítulo anterior: NGC 1386 e NGC 7213. Estas duas galáxias foram analisadas aqui com o intuito original de estabelecer vínculos entre as propriedades observadas do toro de poeira, a atividade nuclear e o conteúdo estelar das galáxias hospedeiras.

Já a amostra para imagens de alta resolução foi inicialmente concebida como 4 galáxias de classificação espectral distinta, sendo uma Seyfert 1, uma LINER e duas Seyfert 2, dentre estas últimas uma apresentava característica de absorção *Compton-thick*. Os critérios de seleção foram: i) alvos visíveis do hemisfério norte; ii) fluxo no filtro de  $12\mu\text{m}$  do satélite infravermelho IRAS maior do que  $0.2 \text{ Jy}$ ; iii) alvos não presentes em nenhum grande programa do Gran Telescopio Canarias (GTC). Este último item se justifica pela intenção de obter dados para alvos inéditos, ao mesmo tempo em que se busca satisfazer os objetivos científicos do trabalho.

Uma segunda parte desta amostra foi composta por todas as observações relatadas



no atlas compilado por Asmus et al. (2014), tomadas pelo instrumento VISIR locado no telescópio UT3 do conjunto de telescópios VLT, em Cerro Paranal. Alcançamos um total de 13 AGNs com detecção simultânea nos dois filtros de interesse, a saber: PAH2 e PAH2\_2. A similaridade entre os instrumentos viabiliza uma análise homogênea dos dados, que possuem profundidade e resolução espacial virtualmente indistinguíveis.

O conjunto de galáxias observadas com imagens de alta resolução está muito aquém de constituir uma amostra completa tanto em volume como em luminosidade. Se fizermos uma extrapolação baseada na combinação entre os catálogos de AGNs de Véron-Cetty e Véron (2010) e no catálogo de fontes IRAS de Rush et al. (1993) chegamos a aproximadamente 76 galáxias com núcleos ativos, fluxos em  $12\mu\text{m}$  superiores a  $0.2 \text{ Jy}$  e  $z < 0.03$ . Assim, nosso estudo representa aproximadamente 20% das fontes que satisfazem estes critérios.

## 4.2 Formação estelar em escalas de $kpc$ .

### 4.2.1 Fotometria no filtro de $8\mu\text{m}$ : NGC 1386 e NGC 7213

As imagens PAH8 (figura 4.1) revelam apenas emissão interestelar, que neste caso consiste majoritariamente das bandas de PAH e uma pequena contribuição de poeira quente, com exceção do núcleo das galáxias, onde a emissão é dominada pelo AGN. Em ambas as galáxias as imagens são caracterizadas por um intenso fluxo no núcleo envolto por estruturas maiores ao longo da galáxia hospedeira, que no caso de NGC 1386 lembram um anel alongado. Uma elipse que ajuste o pico de emissão deste anel tem semieixos de  $6.5''$  e  $14.5''$  com o semieixo maior tendo  $PA = 25^\circ$ . Desconsiderando a largura intrínseca deste anel nós obtemos uma inclinação com relação ao plano do céu de  $65^\circ$ . O semieixo maior corresponde a aproximadamente  $750 \text{ pc}$ . A distribuição de PAH pode estar relacionada com as faixas de poeira vistas em imagens ópticas do telescópio espacial Hubble (HST). Na figura 4.2 são apresentados os contornos da figura 4.1 superpostos a imagem na filtro F606W da câmera Wide-Field Planetary Camera 2 (WFPC2). Em NGC 7213 vemos que a emissão interestelar segue os braços espirais atingindo distâncias de até  $10 \text{ kpc}$  do centro. Adicionalmente detectam-se várias regiões HII distribuídas ao longo do braço espiral, sendo que a de brilho mais intenso coincide com a extração NW.

Os fluxos para a imagem do IRAC foram obtidos pela soma direta do fluxo de cada pixel dentro das aberturas definidas. Não foram aplicadas correções para pixels parciais nas regiões limítrofes, já que uma abertura de  $3.6''$  corresponde a mais de 110 pixels nas

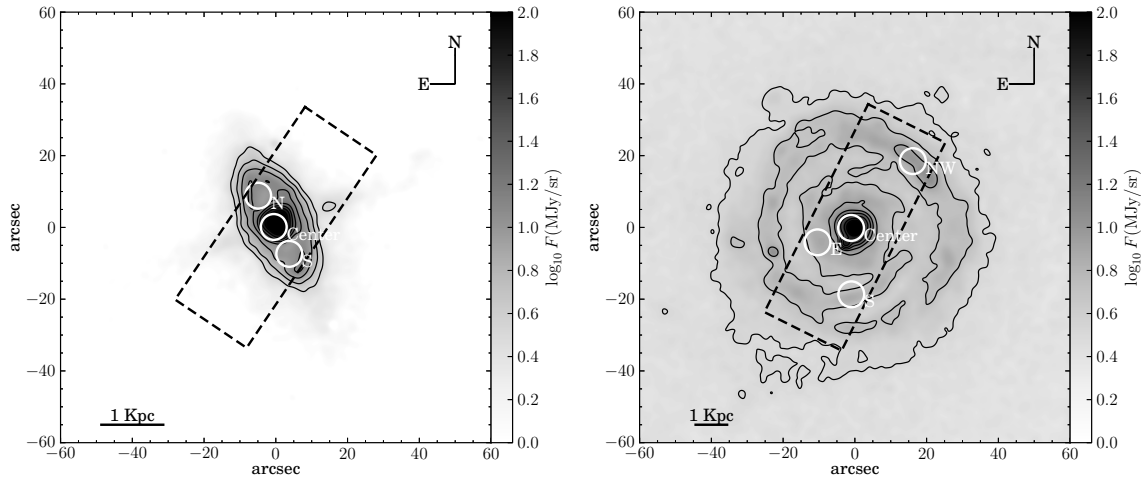


Figura 4.1: Imagens resultantes da subtração da componente estelar das imagens em  $8\mu\text{m}$  (ver seção 2.1. As imagens da esquerda para a direita correspondem a NGC 1386 e NGC 7213 respectivamente, e são centradas no núcleo óptico das galáxias.

Tabela 4.1: Luminosidades medidas nos espectros e imagens do Spitzer

Região	$L(\text{PAH8}) \times 10^{42}$ ( $\text{erg s}^{-1}$ )	$L([\text{Ne II}]) \times 10^{38}$ ( $\text{erg s}^{-1}$ )
NGC 1386		
Centro	35.38	12.70
N	2.55	1.96
S	2.34	2.06
NGC 7213		
Centro	78.86	78.44
NW	5.64	5.82
E	4.11	3.95
S	3.30	3.76

imagens da IRAC, e variações no número de pixels circunscritos são menores do que 5%. A luminosidade de cada abertura é apresentada na tabela 4.1. As aberturas centrais tem um fluxo aproximadamente 15 vezes maior do que as aberturas sobre a galáxia hospedeira, principalmente por que a radiação do AGN não é removida na subtração da componente estelar.

#### 4.2.2 Fluxos e larguras equivalentes da galáxia hospedeira

Os espectros unidimensionais na figura 2.4 (extraídos sobre as mesmas regiões utilizadas nas imagens da IRAC) foram utilizados para medir fluxos e larguras equivalentes de bandas de PAH e linhas iônicas através do código PAHFIT (Smith et al., 2007b). Ajustando diversas feições espectrais de origem atômica e molecular, juntamente com emissão

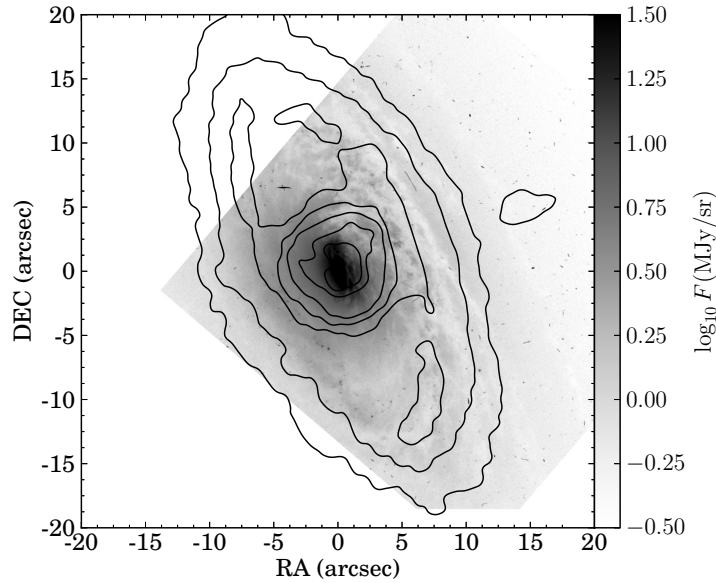


Figura 4.2: Contornos da figura 4.1 superpostos a imagem do HST no filtro F606W. Faixas de poeira, vistas como regiões altamente absorvidas na imagem óptica, são quase sempre seguidas por uma intensa emissão de PAH.

Tabela 4.2: EW de feições selecionadas no espectro do IRS em unidades de  $\mu\text{m}$ .

Feição	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	NGC 1386			NGC 7213			
		$W_\lambda$ Centro	$W_\lambda$ N	$W_\lambda$ S	$W_\lambda$ Centro	$W_\lambda$ E	$W_\lambda$ NW	$W_\lambda$ S
[SIV]	10.5	0.08	–	–	–	–	–	–
[NeII]	12.8	0.02	0.06	0.06	0.08	0.10	0.25	0.28
PAH	6.2	–	0.34	0.23	0.04	0.09	6.15	0.04
PAH	7.7	0.36	1.56	1.00	0.13	0.35	7.29	0.51
PAH	8.6	–	0.94	0.51	–	0.25	2.38	1.07
PAH	11.3	0.12	1.00	0.75	–	0.94	2.22	2.06

e absorção de grãos de poeira e um contínuo estelar, este código é capaz de produzir medidas de fluxo muito mais precisas do que seria possível supondo um contínuo linear subjacente. A tabela 4.2 lista as larguras equivalentes (EW) de algumas feições proeminentes no espectros do IRS, e a tabela 4.1 mostra a luminosidade da linha  $12.8\mu\text{m}$  [NeII]. A linha de alto potencial de ionização  $10.5\mu\text{m}$  [SIV] é detectada apenas no núcleo de NGC 1386. As bandas de PAH são notadamente mais pronunciadas nas extrações da galáxias hospedeira em ambos os casos.

A abertura NW na galáxia NGC 7213 tem os maiores valores de EW para as bandas de PAH, o que sugere intensa formação estelar, ou uma população estelar muito jovem. Esta hipótese é corroborada pelo estudo óptico de Storchi-Bergmann et al. (1996). Apesar de as aberturas deste último não serem diretamente comparáveis às deste trabalho, a linha

$H\beta$  na extração NW apresenta alta EW, uma característica de populações jovens (Copetti et al., 1986).

### 4.2.3 Taxas de formação estelar a partir de dois indicadores independentes

Ho e Keto (2007) demonstraram uma correlação entre a luminosidade das linhas  $12.8\mu\text{m}$  [NeII] e  $15.7\mu\text{m}$  [NeIII] e a taxa de formação estelar estimada através da linha de recombinação do Hidrogênio  $\text{Br}\alpha$ . Isto permite utilizar estas transições de estrutura fina como indicadores de formação estelar. Na figura 4.3 estão reproduzidos os dados de Giveon et al. (2002), Willner e Nelson-Patel (2002) para regiões HII da Galáxia, Nuvens de Magalhães e M33, mostrando uma relação empírica entre  $L_{[\text{NeII}]}$  e  $L_{\text{Br}\alpha}$ . A correlação entre estas duas quantidades é evidente, especialmente para luminosidades menores. Na parte superior do gráfico se nota muito mais espalhamento na luminosidade de [NeII], alcançando mais de uma ordem de magnitude entre os últimos três pontos. Um ajuste linear aos pontos da figura 4.3 resulta em

$$\log \frac{L_{\text{Br}\alpha}}{L_{\odot}} = 1.05 \times \log \frac{L_{[\text{NeII}]}}{L_{\odot}} - 0.99. \quad (4.1)$$

Para derivar a SFR pode-se escolher entre um número de relações disponíveis entre o contínuo de Lyman e a emissão do H. Neste trabalho usamos a estimativa de SFR baseada na luminosidade de  $H\alpha$  (Kennicutt, 1998b) para uma função inicial de massa (IMF) de Salpeter com massas entre  $0.1M_{\odot}$  -  $100M_{\odot}$  e abundância solar. De maneira a obter uma SFR em termos de  $L_{\text{Br}\alpha}$  usamos a razão intrínseca  $j_{H\alpha}/j_{\text{Br}\alpha} = 35.75$ , supondo caso B de recombinação e temperatura eletrônica  $T_e = 10^4$  K e densidade eletrônica  $n_e = 10^2 \text{ cm}^{-3}$  (Brocklehurst, 1971).

$$SFR(M_{\odot}\text{yr}^{-1}) = 2.82 \times 10^{-40} L_{\text{Br}\alpha}(\text{erg s}^{-1}). \quad (4.2)$$

Usando as equações 4.1 e 4.2 juntamente com a luminosidade da linha  $12.8\mu\text{m}$  [NeII] podemos agora estimar a SFR. Como as distâncias entre as galáxias são muito diferentes baseamos a discussão seguinte na densidade superficial de taxa de formação estelar ( $\Sigma_{\text{SFR}}$ ). Os valores obtidos para  $\Sigma_{\text{SFR}}$  e a estimativa de  $L_{\text{Br}\alpha}$  são apresentados na tabela 4.3. Os erros em  $\Sigma_{\text{SFR}}$  incluem o RMS do ajuste da equação 4.1. Nossas estimativas são comparáveis àquelas encontradas por Kennicutt (1998a) para galáxias espirais normais.

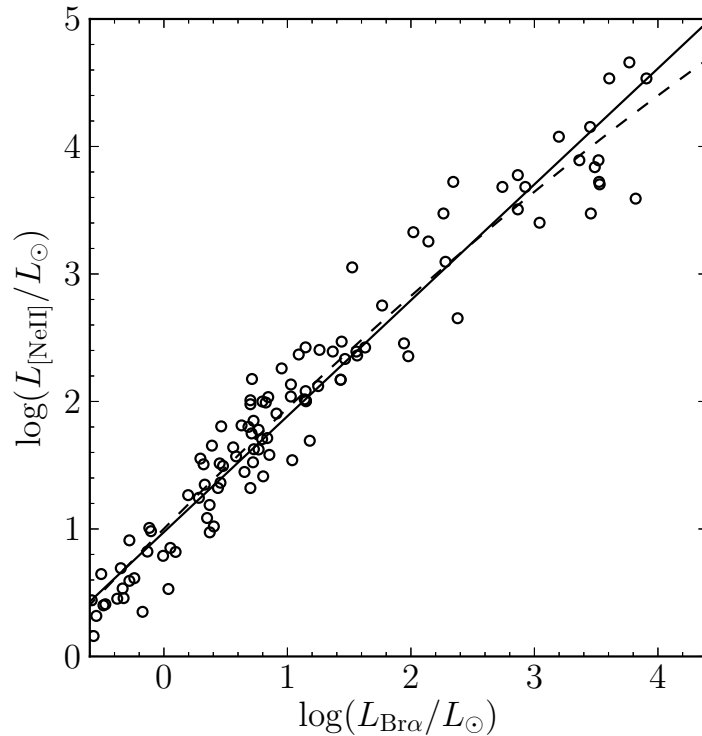


Figura 4.3: Correlação entre as luminosidades de  $12.8\mu\text{m}$  [NeII] e  $\text{Br}\alpha$  a partir dos dados de (Giveon et al., 2002; Willner e Nelson-Patel, 2002). A linha sólida representa um ajuste linear e a linha tracejada representa um polinômio de segunda ordem.

Para testar os resultados derivados a partir da linha de emissão iônica nós comparamos estes valores com uma estimativa completamente independente para SFR baseada no fluxo fotométrico de PAH nas imagens em  $8\mu\text{m}$  (tabela 4.3). Conforme demonstrado por Wu et al. (2005), a relação

$$SFR(M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = \frac{\nu L_{\nu}[8\mu\text{m}]}{1.57 \times 10^9 L_{\odot}}. \quad (4.3)$$

pode ser utilizada para determinar a SFR.

A figura 4.4 mostra a correlação entre  $\Sigma_{\text{SFR}}$  derivada a partir de cada um dos indicadores. Um ajuste linear para estes pontos, levando em consideração as incertezas em ambos os eixos, tem uma inclinação de  $18 \pm 8$  e intercepta o eixo  $\Sigma_{\text{SFR}}(\text{PAH})$  em  $-0.3 \pm 0.5$ . Em outras palavras, existe um fator de aproximadamente uma ordem de magnitude entre as duas estimativas. Erros na subtração da emissão estelar e outras fontes não relacionadas a populações jovens poderiam, ao menos parcialmente, serem responsáveis pela sobre-estimativa fotométrica. Este efeito já foi relatado por Calzetti et al. (2007), onde os autores argumentam que estas bandas de PAH também são suscetíveis a excitação por

Tabela 4.3: Densidade superficial de SFR

Região	$L_{\text{Br}\alpha} \times 10^{-38}$ ( $\text{erg s}^{-1}$ )	$\Sigma_{\text{SFR}}(\text{PAH8}) \times 10^2$ ( $M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ )	$\Sigma_{\text{SFR}}([\text{NeII}]) \times 10^2$ ( $M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ )
NGC 1386			
N	0.61	$111 \pm 28$	$13 \pm 3$
S	0.64	$102 \pm 26$	$12 \pm 4$
NGC 7213			
NW	2.38	$62 \pm 16$	$12 \pm 3$
E	1.44	$45 \pm 11$	$8 \pm 2$
S	1.36	$36 \pm 9$	$7 \pm 2$

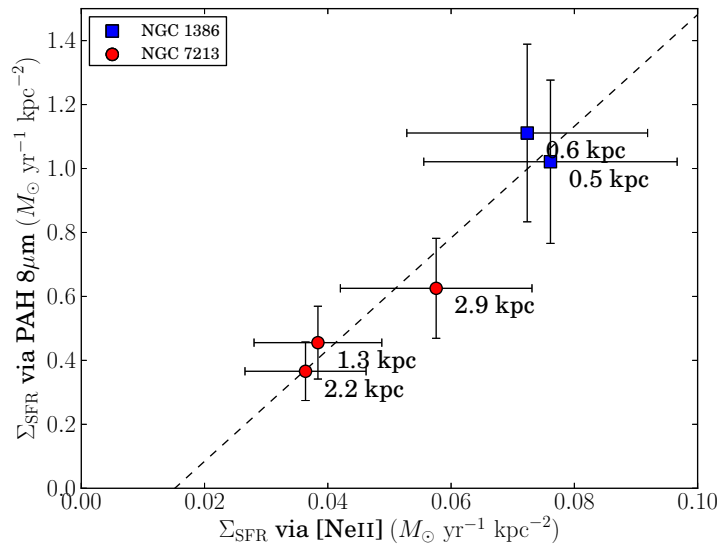


Figura 4.4: Comparação entre  $\Sigma_{\text{SFR}}$  para as três regiões de NGC 7213 e duas regiões de NGC 1386. Os resultados a partir do fluxo fotométrico da imagem PAH8 consistentemente sobrestimam  $\Sigma_{\text{SFR}}$  em relação ao calculado a partir do fluxo da linha de [NeII] em  $12.8 \mu\text{m}$ . As distâncias galactocêntricas de cada extração estão indicadas ao lado de cada ponto.

fótons de populações mais velhas. Outrossim o espalhamento na parte de alta luminosidade da figura 4.3 poderia facilmente explicar esta discrepância, mesmo sem invocar erros na fotometria.

Apesar do desacordo entre os indicadores de SFR a figura geral é internamente preservada, com as regiões HII de NGC 1386 tendo maior  $\Sigma_{\text{SFR}}$  que os seus pares em NGC 7213. A diferença notável entre as galáxias é localização destas regiões HII, que parecem concentradas em um anel circum-nuclear no caso de NGC 1386 e ao longo dos braços espirais em NGC 7213.

### 4.3 PAH 11.3 $\mu\text{m}$ em alta resolução

A abordagem inicial para o estudo das imagens de alta resolução no MIR foi tentar identificar a morfologia da região emissora de PAH. Como já discutido na seção 2.3, os filtros dos dois instrumentos utilizados (CanariCam e VISIR) são muito próximos e apresentam uma considerável superposição nas suas curvas de transmissão <sup>1</sup>. De tal sorte que não é possível simplesmente subtrair um filtro do outro, supondo o primeiro como representativo do nível de contínuo. Outrossim, a largura típica para a banda de emissão da molécula de PAH em 11.3 $\mu\text{m}$  é próxima a 0.5 $\mu\text{m}$ , por tanto contaminando ambos os filtros.

Não obstante estas dificuldades, é possível inferir uma discrepância na diferença entre os filtros, do que seria esperado se apenas o contínuo estivesse presente. Para isso, porém, é preciso dispor de uma boa estimativa para a forma do contínuo subjacente a emissão de íons e moléculas. Nesta faixa espectral a emissão do contínuo é principalmente um resultado da emissão de corpo negro da poeira, o espectro exponencial do AGN e a absorção provocada por grãos de silicato, provavelmente associada ao toro de poeira que circunda o disco de acreção. Como exemplo desta ligação destacamos alguns dos recentes estudos de espectroscopia de alta resolução espacial na faixa do MIR e como eles se comparam com os dados que englobam porções maiores da galáxia hospedeira (Sales et al., 2014; González-Martín et al., 2014; Esquej et al., 2014), bem como nossos próprios resultados discutidos na seção 3. Frisamos que não nos referimos a concordância entre os fluxos, porém sim entre as declividades do contínuo<sup>2</sup>. Assim sendo, mesmo um espectro com resolução espacial da ordem de poucos segundos de arco deve ter um contínuo muito similar ao da região limitada a décimos de segundo de arco.

Seguindo este raciocínio, nos valem mais uma vez dos dados de arquivo do espectrógrafo IRS abordo do telescópio espacial Spitzer, e dos ajustes espectrais da rotina PAHFIT (Smith et al., 2007b). Com o contínuo estimado por este programa, podemos inferir qual deveria ser a diferença entre o fluxo medido em cada filtro, para o caso de não estar presente a emissão de PAH. Esta discrepância, ou excesso, é definida como

$$E = \left| I_1 - I_2 \frac{\int F_1 C d\lambda}{\int F_2 C d\lambda} \right|, \quad (4.4)$$

---

<sup>1</sup>Ver figura 2.6

<sup>2</sup>Referimos o leitor à figura 3.1, onde são comparadas as componentes estendida e nuclear de um espectro de alta resolução espacial para a galáxia NGC 1386

onde  $I_n$  é o fluxo medido no filtro  $n$ ,  $F_n$  é a função de transmissão deste mesmo filtro e  $C$  representa o contínuo estimado para o espectro. A razão entre integrais na equação 4.4 faz o papel de um fator de escala, tornando  $E = 0$  para o caso da diferença entre fluxos ser idêntica a diferença de fluxos no contínuo. Naturalmente a estimativa para a função de contínuo, e por consequência o fator de escala entre os filtros, tiveram de ser avaliados independentemente para cada uma das galáxias da amostra.

Os espectros utilizados são aqueles disponíveis no Cornell Atlas of Spitzer/IRS Sources<sup>3</sup> (CASSIS). Espectros ausentes no CASSIS, notavelmente aquelas galáxias que possuem apenas observações em modo de mapeamento, foram reduzidos através do programa CUBISM, seguindo a metodologia discutida na seção 2.1.1.

Nas figuras 4.5 e 4.6 apresentamos o resultado da subtração entre os filtros, dividido pela diferença entre os filtros encontrada para o contínuo estimado a partir dos dados do Spitzer. As unidades da escala de cor são o desvio padrão do fundo.

É importante ressaltar que, em muitos casos, as imagens foram tomadas em diferentes noites de observação para cada filtro. Assim, alguns efeitos decorrentes das diferenças na PSF para cada noite podem assemelhar-se a estruturas próximas do limite de resolução. Chamamos a atenção do leitor para os indicadores de elipses em cada um dos painéis das figuras 4.5 e 4.6, que indicam a mais alargada das PSFs de cada par.

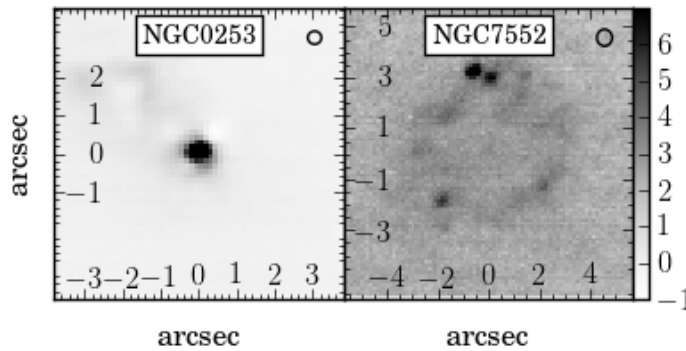


Figura 4.5: Mapas de emissão de PAH para fontes estendidas. As elipses no canto superior direito representam a meia altura da PSF para cada imagem.

A grande maioria das galáxias observadas aparece apenas como uma fonte não resolvida nesta profundidade, como visto também no capítulo 2. Apenas as galáxias NGC 253 e NGC 7552 apresentam uma estrutura espacialmente resolvida nos mapas de PAH. Esta última em especial não apresenta nenhuma emissão de PAH no núcleo (centro da imagem), mas sim em um anel com um raio de cerca de 300 pc de raio, com algumas nós de

<sup>3</sup>Acessado em 8 de Junho de 2015: <http://cassis.astro.cornell.edu/atlas/>



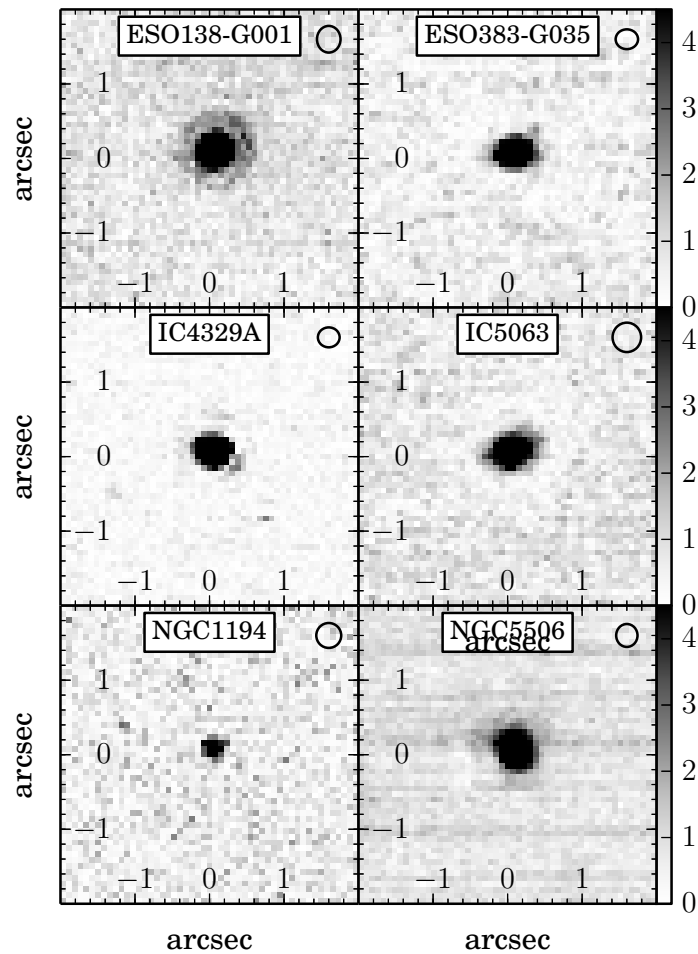


Figura 4.6: Mapas de emissão de PAH para fontes estendidas. As elipses no canto superior direito representam a meia altura da PSF para cada imagem.

regiões HII angularmente resolvidos. Este resultado já havia sido reportado em Brandl et al. (2012).

### 4.3.1 Fotometria

Os fluxos fotométricos foram obtidos através de fotometria de abertura, com o raio da abertura virtual dado pela FWHM da estrela padrão da noite de cada observação, e o centro dado pelo centroide de uma gaussiana bidimensional ajustada a imagem. Um annulus separado da abertura por uma FWHM, e tendo uma largura igual a esta última, foi utilizado para estimar o nível de fundo e sua flutuação, que por sua vez levou a estimativa da incerteza. Os resultados fotométricos, bem como algumas informações úteis da literatura encontram-se na tabela 4.4.

Comparamos os espectros de Spitzer com os pontos fotométricos obtidos através das

Tabela 4.4: Fluxos fotométricos

ID	Alvo	z	$L_{2-10 \text{ keV}}$ (log erg s <sup>-1</sup> )	Escala (parsec/")	Abertura "	$f_{\text{PAH}}$ (mJy)	$f_{\text{REF}}$ (mJy)	$L_{\text{AGN}}$ (log erg s <sup>-1</sup> )	$L_{\text{PAH}}$ (10 <sup>40</sup> erg s <sup>-1</sup> )	$L_{\text{SB}}$ (log erg s <sup>-1</sup> )
1	ESO 005-G004	0.006	41.92 <sup>a</sup>	128	0.35	26 ± 12	36 ± 25	42.94	2.55	< 42.5
2	ESO 138-G001	0.009	42.52 <sup>b</sup>	191	0.34	979 ± 19	900 ± 32	43.65	33.79	43.7
3	ESO 383-G035	0.008	42.41 <sup>c</sup>	164	0.28	451 ± 18	412 ± 19	43.52	9.74	43.1
4	IC 4329A	0.016	43.70 <sup>d,e</sup>	332	0.30	1485 ± 31	1060 ± 52	45.13	1032.60	45.2
5	IC 5063	0.011	42.94 <sup>f</sup>	234	0.39	812 ± 26	446 ± 28	44.17	219.13	44.5
6	Mrk 1239	0.020	40.82 <sup>g</sup>	413	0.34	522 ± 11	574 ± 20	41.70	469.99	< 44.8
7	NGC 0253	0.001	40.00 <sup>h</sup>	18	0.35	1902 ± 95	1176 ± 115	40.83	3.30	42.7
8	NGC 0931	0.016	43.28 <sup>i</sup>	338	0.25	210 ± 10	217 ± 12	44.60	252.50	< 44.5
9	NGC 1194	0.014	42.64 <sup>j</sup>	282	0.49	109 ± 17	65 ± 7	46.38	225.85	44.5
10	NGC 2273	0.006	42.23 <sup>k</sup>	128	0.31	111 ± 5	106 ± 6	43.30	2.43	< 42.5
11	NGC 5128	0.002	42.31 <sup>l</sup>	37	0.30	1059 ± 61	1553 ± 30	43.40	0.44	< 41.8
12	NGC 5506	0.006	43.01 <sup>c</sup>	122	0.30	1005 ± 45	917 ± 31	44.26	22.55	43.5
13	NGC 5995	0.025	43.53 <sup>m</sup>	521	0.30	413 ± 8	413 ± 10	44.92	747.70	< 45.0
14	NGC 6240	0.024	44.26 <sup>n</sup>	504	0.63	223 ± 41	324 ± 39	45.87	700.80	< 45.0
15	NGC 7469	0.016	43.02 <sup>o</sup>	330	0.32	497 ± 97	646 ± 19	44.27	200.94	< 44.5
16	NGC 7552	0.005	40.40 <sup>p</sup>	112	0.63	655 ± 146	145 ± 34	41.25	49.40	43.8

<sup>a</sup> Winter et al. (2009); <sup>b</sup> Piconcelli et al. (2011); <sup>c</sup> Nandra et al. (2007); <sup>d</sup> Shinozaki et al. (2006); <sup>e</sup> Bianchi et al. (2009); <sup>f</sup> Marinucci et al. (2012); <sup>g</sup> Corral et al. (2011); <sup>h</sup> Müller-Sánchez et al. (2010); <sup>i</sup> Ueda et al. (2011); <sup>j</sup> Greenhill et al. (2008); <sup>k</sup> Awaki et al. (2009); <sup>l</sup> Shu et al. (2011); <sup>m</sup> Ueda et al. (2005); <sup>n</sup> González-Martín et al. (2006); <sup>o</sup> González-Martín e Vaughan (2012); <sup>p</sup> Brightman e Nandra (2011);

imagens em alta resolução na figura 4.7. Ressaltamos que não é esperado que os fluxos sejam semelhantes entre os dados do Spitzer e dos telescópios terrestres, e sim a declividade do contínuo. Naturalmente, se em alguma fonte houver emissão de PAH na região nuclear, o pontos fotométricos se afastarão do contínuo.

Notamos que as galáxias IC 4329A e IC 5063 apresentam fluxos que destoam muito do esperado pelo espectro do Spitzer. Algumas das galáxias de nossa amostra possuem as luminosidades de PAH 11.3 μm medidas sobre espectros por Esquej et al. (2014), utilizando dados de diversos espectrógrafos MIR terrestres. Outras galáxias também tem espectros de alta resolução angular publicados em Burtscher et al. (2013). Comparando nossos resultados vemos que para a galáxia IC 5063 o espectro de alta resolução angular (Esquej et al., 2014) não condiz com a emissão que estimamos, sendo muito similar ao espectro do Spitzer apresentado na figura 4.7. Uma situação similar é encontrada com IC 4329A, quando visualmente comparada com o espectro publicado por Burtscher et al. (2013). Por conta destas discrepâncias, recomendamos ao leitor cautela na interpretação dos resultados para estas galáxias.

### 4.3.2 Derivação do fluxo na banda de PAH

Para satisfazer os nossos objetivos quantitativos neste estudo é necessário chegar ao total de fluxo emitido na banda aromática em 11.3μm, a partir da diferença entre os fluxos

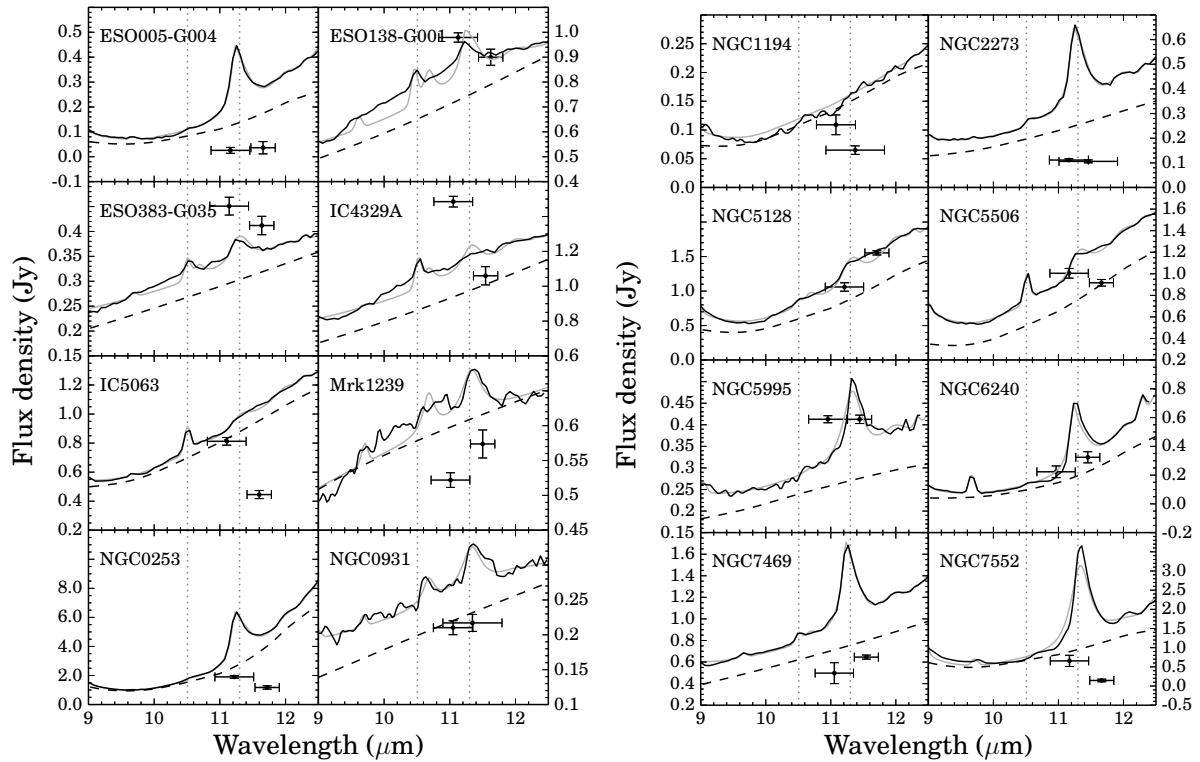


Figura 4.7: Comparação entre os pontos fotométricos e os espectros do Spitzer (*linha preta sólida*). Também representados estão o espectro modelado pelo programa PAHFIT e o contínuo estimado (*linha cinza*).

medidos em cada um dos filtros. É importante notar que os diferentes *redshifts* em que se encontram as galáxias fazem com que porções diferentes da banda de emissão sejam amostradas por cada filtro.

O método desenvolvido aqui consiste em analisar o comportamento dos fluxos fotométricos para uma grade de diferentes espectros modelados. Foram gerados, para cada curva de contínuo obtida na seção 4.2,  $10^4$  espectros simulados, com 100 níveis de intensidade para a banda de PAH e 100 valores de *redshift*. Abaixo discutimos como estes dois parâmetros estão relacionados com o fluxo total emitido na banda de PAH em  $11.3\mu\text{m}$ .

Começamos supondo que a porção do espectro na qual estamos interessados pode ser bem representada pela soma entre um contínuo  $C(\lambda)$  e a emissão de PAH  $I(\lambda)$ , como em

$$S(\lambda) = C(\lambda) + I(\lambda). \quad (4.5)$$

A emissão de PAH foi modelada, seguindo a prescrição de Smith et al. (2007a), pela soma de dois perfis de Drude

$$I_\nu = \frac{b_r \gamma_r}{(\lambda/\lambda_r - \lambda_r/\lambda)^2 + \gamma_r^2}, \quad (4.6)$$

onde  $b_r$  é a intensidade central,  $\gamma_r$  é a largura a meia altura proporcional  $\text{FWHM}/\lambda_r$  e  $\lambda_r$  é o comprimento de onda central. Os valores de  $\lambda_r$  e  $\gamma_r$  que definem os dois perfis são respectivamente  $11.22\mu\text{m}$  e  $0.012$  para o primeiro e  $11.33\mu\text{m}$  e  $0.032$  para o segundo. Na figura 4.8 apresentamos um exemplo deste espectro simulado onde podem ser vistas as duas bandas moleculares que compõe a feição espectral de PAH em  $11.3\mu\text{m}$ . Na grade de espectros simulados a intensidade relativa entre os dois perfis de Drude foi mantida igual a um, pois os testes que realizamos demonstram pouco efeito deste parâmetro sobre a diferença entre os filtros.

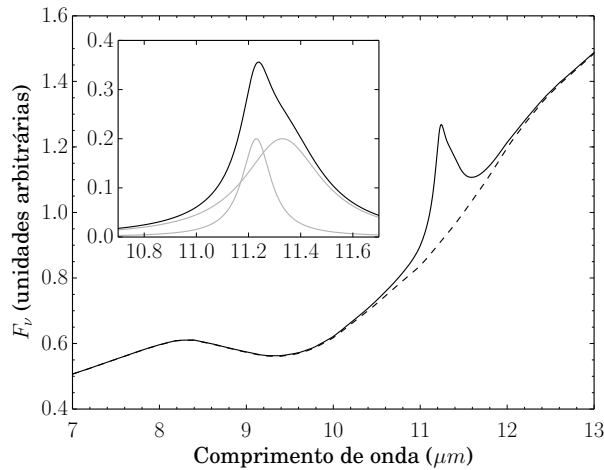


Figura 4.8: Exemplo de espectro teórico utilizado para estimar a emissão de PAH em  $11.3\mu\text{m}$  com base na diferença entre os fluxos dos filtros. O espectro observável (*linha preta sólida*) é o resultado da soma da combinação da absorção de silicato (*linha tracejada*) e das duas bandas moleculares de PAH. O gráfico menor destaca a composição dos dois perfis de Drude (*linhas cinza*).

O fluxo  $f_n$  medido em qualquer filtro é essencialmente uma média ponderada, com a função de transmissão do filtro servindo como peso. Ou seja

$$f_n = \int F_n(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (4.7)$$

com  $F_n$  sendo a curva de transmissão normalizada do filtro  $n$  e  $S$  a função que dá o espectro observado. É fácil demonstrar que, em sendo válidas as suposições acima, a diferença entre os filtros  $D$  é apenas uma função da intensidade central dos perfis que compõe a banda de PAH e do *redshift*:

$$\begin{aligned}
D(b_r, z) &= \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} F_1(\lambda) S(\lambda, z) d\lambda - \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} F_2(\lambda) S(\lambda, z) d\lambda \\
&= \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} [C_v(\lambda, z) + I_v(b_r, \lambda, z)] \times [F_1(\lambda) - F_2(\lambda)] d\lambda.
\end{aligned} \tag{4.8}$$

A intensidade total emitida na banda de PAH é a soma das integrais da função 4.6, e pode ser escrita como

$$F_{\text{PAH}} = \frac{\pi c}{2} \left( \frac{b_1 \gamma_1}{\lambda_1} + \frac{b_2 \gamma_2}{\lambda_2} \right), \tag{4.9}$$

onde os subíndices indicam as diferentes componentes. Em termos práticos, para cada valor de intensidade central  $b_r$ , podemos agora chegar a uma diferença entre os fluxos fotométricos e uma intensidade total emitida na banda de PAH, supondo um  $z$  conhecido. O resultado para uma grade de modelos sobre uma curva de contínuo média é apresentado na figura 4.9, com a emissão em PAH dada pela escala de cores, e a diferença entre os filtros e o *redshift* formando o plano. Chamamos a atenção do leitor para a faixa de coloração mais escura nesta figura, que representa o máximo na emissão de PAH. Nota-se que para uma mesma intensidade a diferença entre os filtros decresce conforme o valor de  $z$  aumenta, devido ao fato de que uma parte maior da banda de emissão está entrando no domínio do filtro de referência, ou filtro de contínuo. Próximo ao *redshift* 0.017 ocorre uma inversão, e o filtro originalmente designado para a emissão molecular passa a ser mais representativo do contínuo e vice-versa.

Como já mencionado, algumas destas galáxias possuem espectros de alta resolução angular publicados, e luminosidades de PAH 11.3  $\mu\text{m}$  para elas são apresentadas em Esquej et al. (2014). Podemos então comparar nossas estimativas com os dados advindos da espectroscopia. Para a galáxia NGC 5128 nossa estimativa de  $0.44 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$  é compatível com os  $0.6 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$  dos dados espectrais publicados por Esquej et al. (2014), contudo nós consideramos este valor como um limite superior, e não uma detecção. O único caso de detecção positiva que compartilhamos é o de NGC 5506, com nossa estimativa cerca de quatro vezes superior. Este mesmo fator é encontrado na comparação dos dados da NGC 7469, que consideramos um limite superior. Dada esta variação nas nossas estimativas, conservadoramente adotamos um intervalo de incerteza de uma ordem de magnitude.

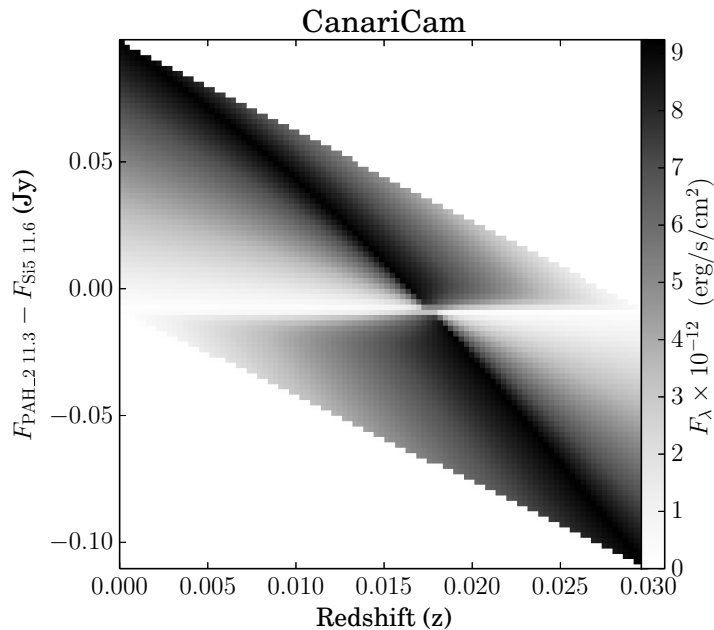


Figura 4.9: Análise dos efeitos de *redshift* e intensidade da banda de PAH sobre a diferença nos fluxos fotométricos para a CanariCam. Próximo a  $z = 0.017$  o filtro de referência PAH2\_2 passa a compreender uma fração maior da banda molecular do que o filtro PAH2.

### 4.3.3 Taxa de formação estelar a partir do PAH em $11.3\mu\text{m}$

Dispondo do fluxo emitido pelo PAH em  $11.3\mu\text{m}$ , é possível empregar uma conhecida relação empírica entre a luminosidade desta feição espectral e a taxa de formação estelar. Baseando-se nos modelos para o espectro no MIR da galáxias *starburst* de Rieke et al. (2009), Diamond-Stanic e Rieke (2012) chegaram a equação

$$\dot{M}_* (M_\odot \text{ yr}^{-1}) = 9.6 \times 10^{-9} L_{\text{PAH}}(L_\odot), \quad (4.10)$$

que é válida para *starbursts* com  $\dot{M}_* < 10 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ , onde  $L_{\text{PAH}}$  é a luminosidade da banda de  $11.3\mu\text{m}$ . Esta equação foi calculada para galáxias caracterizadas por  $10^{9.75} < L_{\text{IR}} < 10^{10.75}$ , apresentando uma dispersão de 0.28 dex. A mediana de  $L_{\text{IR}}$  para a nossa amostra é  $10^{10.65}$ , com três galáxias acima de  $L_{\text{IR}}$ , o que nos deixa no limite superior de validade da relação em 4.10. Por cautela tratamos as incertezas em  $\dot{M}_*$  como 1 dex. Veremos que mesmo com este excesso de zelo as principais conclusões do trabalho não são severamente afetadas.

Partindo da dependência massa-energia podemos escrever a luminosidade da região nuclear de formação estelar  $L_{\text{SB}}$  como uma função da taxa de formação estelar. Segundo

Kawakatu e Wada (2008) temos

$$L_{\text{SB}} = 0.14\epsilon\dot{M}_*c^2 \quad (4.11)$$

onde  $\epsilon$  é a eficiência de conversão de matéria em energia, aqui fixada em 0.007, e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

Estas últimas duas equações resultam na seguinte expressão para luminosidade do *starburst* em termos da emissão de PAH:

$$L_{\text{SB}}(\text{erg s}^{-1}) = \epsilon c^2 2.2 \times 10^{-17} L_{\text{PAH}}(\text{erg s}^{-1}). \quad (4.12)$$

As luminosidades devidas a formação estelar circum-nuclear derivadas seguindo esta metodologia são apresentadas na tabela 4.4.

Gostaríamos de salientar que das oito galáxias que tiveram detecção de formação estelar circum-nuclear, quatro já possuíam estudos na literatura que sugeriam ser este o caso. Uma vez que as observações no MIR são menos sensíveis a extinção provocada pelo meio interestelar, este resultado é razoavelmente esperado. O oposto, contudo, é mais difícil de explicar. Apenas a galáxia NGC 7469 possui evidências de formação estelar circum-nuclear no óptico sem, no entanto, ser detectada na nossa análise. A literatura no entanto é divergente neste caso, com Bonatto e Pastoriza (1990), por exemplo, sustentando populações jovens apenas a partir de  $8''$  do centro, enquanto Muñoz Marín et al. (2007) detectam um anél de formação estelar a  $2''$ . A não detecção por nosso método pode ser devida tanto ao limite de detecção imposto aqui, quanto formação estelar detectada por outros autores estar além da abertura virtual definida na seção 4.3.1.

#### 4.3.4 Implicações e comparação com modelos teóricos

Vários estudos teóricos recentes mostram que o mesmo ambiente que propicia a acreção ao buraco negro super massivo no núcleo das galáxias, também estimula a formação estelar na região próxima ao núcleo galáctico (Kawakatu e Wada, 2008; Hopkins e Quataert, 2010; Neistein e Netzer, 2014, e.g.). Para investigar a possível ligação entre a atividade do SMBH e os episódios de formação estelar nuclear, comparamos as SFRs derivadas a partir da emissão de PAH com a taxa de acreção dos AGNs. Esta última foi estimada a partir da luminosidade em raios-X na banda entre 2-10keV, com correções bolométricas obtidas de

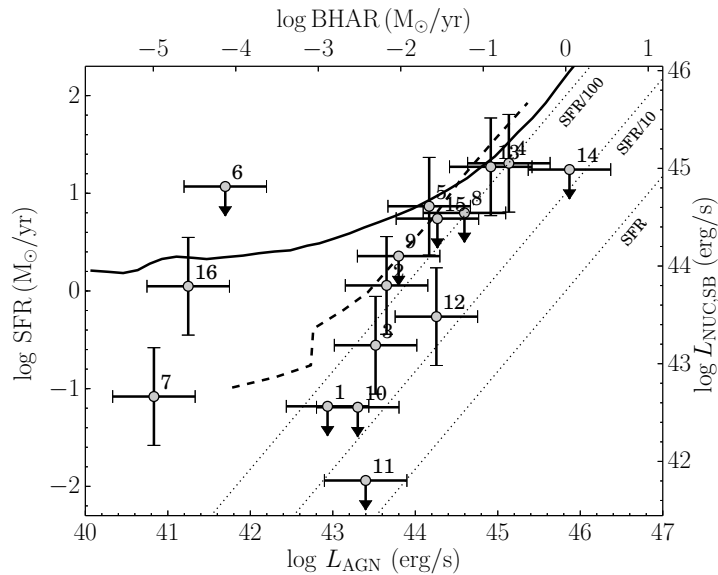


Figura 4.10: Relação entre a luminosidade do AGN e a taxa de formação estelar. Os números correspondem a identificação introduzida na tabela 4.4. As linhas pontilhadas marcam frações constantes entre taxa de acreção e formação estelar com valores de  $\text{BHAR} = \text{SFR}$ ,  $\text{SFR}/10$  e  $\text{SFR}/100$ . As linhas sólida e tracejada representam os dados apresentados em Neistein e Netzer (2014).

$$\log \left[ \frac{L_{12}}{L(2-10 \text{ keV})} \right] = 1.54 + 0.24L_{12} + 0.012L_{12}^2 - 0.0015L_{12}^3, \quad (4.13)$$

(Marconi et al., 2004), onde  $L_{12} = \log(L_{\text{AGN}}) - 12$  e  $L_{\text{AGN}}$  é a luminosidade bolométrica em unidades de  $L_{\odot}$ . Como esta equação é transcendental foi necessário empregar métodos numéricos iterativos para chegar a solução de cada caso. As correções bolométricas resultantes variam entre 7 e 55 para a nossa amostra. Todas as luminosidades bolométricas, bem como os fluxos em raios-X que as precederam, são apresentadas na tabela 4.4. Enfatizamos que o valor de  $L_{\text{AGN}}$  encontrado desta maneira é representativo da taxa de acreção do SMBH no exato instante da observação, enquanto a emissão das moléculas aromáticas é sensível a um evento de formação estelar que pode ter tido início até 150 M anos antes.

Os pontos na figura 4.10 mostram as SFRs da formação estelar nuclear contra a luminosidade bolométrica do AGN. Nesta análise não foi empregada nenhuma forma de compensação da SFR pelas áreas projetadas por que a maioria dos alvos não é espacialmente resolvido. De tal sorte que pelo menos parte da dispersão entre os pontos pode ser diretamente ligada ao fato de estarmos comparando diferentes porções da galáxia hospedeira. Aproveitamos o mesmo gráfico para fazer uma comparação com as previsões



teóricas de Neistein e Netzer (2014), indicando a taxa de formação estelar média para cada intervalo de  $L_{\text{AGN}}$  (linha sólida) e a  $L_{\text{AGN}}$  média para cada intervalo de SFR, em uma grade de modelos semi-empíricos. Notamos que os AGNs de alta luminosidade nesta figura ( $L_{\text{AGN}} > 10^{42}$  ( $\text{erg/s}^{-1}$ )) estão principalmente localizados na região em que estes autores afirmam ser ocupada por fontes nos estágios iniciais de um *starburst*.

Estudos em comprimentos de onda mais longos também mostram uma tendência similar para os AGNs de alta luminosidade. Por exemplo, Rosario et al. (2012) encontraram que as luminosidades de AGNs locais se correlacionam com a SFR para  $L_{\text{AGN}} > 10^{44}$  ( $\text{erg/s}^{-1}$ ), empregando dados do telescópio espacial Hershell em  $60\mu\text{m}$ .

Simulações hidrodinâmicas realizadas por Hopkins e Quataert (2010) também sugerem correlações entre a taxa de acreção e a formação estelar. Este autores concluem que SFRs se aproximam dos valores de taxa de acreção quando considerada apenas a região nuclear definida por  $R < 10\text{pc}$ . Apesar de alguma correlação ainda existir para raios maiores, a dispersão aumenta e a taxa de acreção representa uma fração cada vez menor da SFR.

Na figura 4.10 também indicamos a  $L_{\text{SB}}$  correspondente para as taxas de formação estelar calculadas, assim como as taxas acreção correspondentes as luminosidades bolométricas. O aspecto mais notável é a ausência de galáxias onde  $L_{\text{AGN}} > 100 \times L_{\text{SB}}$ . Ou seja, todas as galáxias da nossa amostra, mesmo as mais energéticas, possuem eventos de formação estelar nuclear que irradiam no mínimo 1% da energia irradiada pelo AGN. Ao mesmo tempo, os AGNs de alta luminosidade possuem regiões de formação estelar circum-nucleares que no máximo irradiam com a mesma intensidade do AGN.

Em se tratando dos AGNs de baixa luminosidade, há três galáxias que apresentam mil vezes mais energia vindo de estrelas jovens do que do AGN. Este resultado concorda com estudos recentes demonstrando a grande importância da formação estelar circum-nuclear em todos os comprimentos de onda para a compreensão dos LLAGN (González-Martín et al., 2014). Nossos resultados também concordam com os modelos teóricos de Kawakatu e Wada (2008) e Wutschik et al. (2013), que sugerem que os AGNs de baixa luminosidade não devem apresentar correlação entre a taxa de acreção e a taxa de formação estelar. De acordo com estes autores, esta falta de correlação representa um estágio onde o disco de gás circum-nuclear torna-se gravitacionalmente estável, cessando a acreção pelo SMBH, porém ainda podendo formar estrelas.

Não encontramos qualquer correlação entre a classificação espectral dos núcleos ativos (i.e. tipos Seyfert) e a presença de formação estelar circum-nuclear. De fato, a mesma taxa de aproximadamente 40% de detecção é preservada para as oito Sy2, seis Sy1 e 2 LINERs

da nossa amostra, embora claramente a relevância estatística deste resultado é baixa. Nós interpretamos isso como ainda mais uma evidência em favor do modelo unificado para o fenômeno AGN.

## 5 *Estudo da cinemática do gás ionizado da galáxia AM2306-721A*

O objetivo central deste capítulo é fornecer subsídios para a interpretação teórica do fenômeno de alimentação de buracos negros centrais, no cenário de acreção estimulada por interação. Neste contexto, o par de galáxias em interação AM2306-721 (Figura 5.1) constitui um excelente candidato para um estudo de caso.

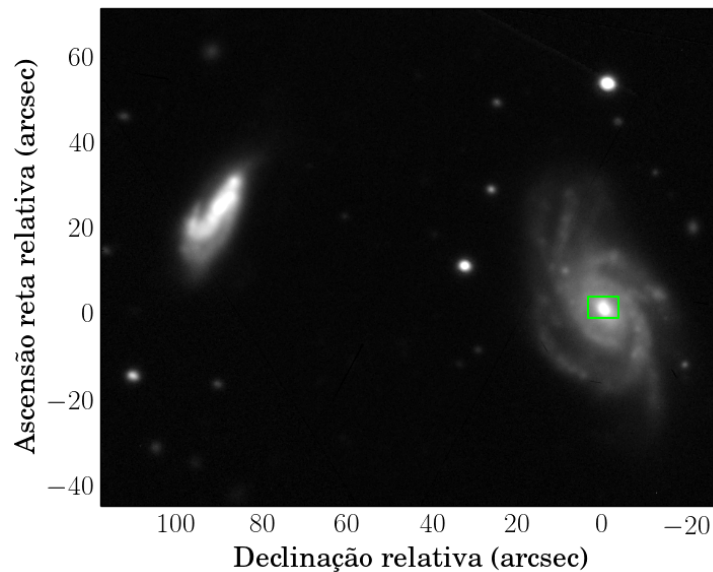


Figura 5.1: Imagem do par AM2306-721A no filtro  $r$

A galáxia principal deste par foi classificada como possuindo características de AGN e de intensa formação estelar por Pastoriza et al. (1999), através de seu espectro óptico (Donzelli e Pastoriza, 1997). A cinemática do gás e a população estelar da galáxia AM2306-721A foram estudadas, utilizando espectros de fenda longa, por Krabbe et al. (2008), encontrando uma importante contribuição de estrelas com idades menores do que 200 milhões de anos. A curva de rotação apresenta desvios de uma rotação simples, principalmente nas áreas coincidentes com regiões HII (*ibid.*). Simulações numéricas da

interação deste par indicam que o quadro atual é resultado de uma passagem peri-galáctica que ocorreu há cerca de 250 milhões de anos. Rosa et al. (2014) mostram que esta galáxia apresenta um gradiente de metalicidade mais raso do que o encontrado em galáxias isoladas, o que seria esperado caso houvesse influxo de material das regiões mais externas para o núcleo. Se assim fosse, também esperaríamos ver formação estelar circum-nuclear e possivelmente um AGN.

Abaixo discutimos os resultados para a análise da cinemática de fenda longa, que envolve a estrutura em grande escala da galáxia, e dos dados de espectroscopia de campo integral obtidos com o instrumento GMOS, que se restringem aos 1.5 kpc centrais <sup>1</sup>.

## 5.1 Ajuste da curva de luz

Como pretendemos estudar a cinemática de uma galáxia que já se sabe complexa, principalmente pela sua participação em uma interação, começamos a nossa discussão pela análise do seu perfil de brilho. Desta maneira podemos identificar subestruturas na distribuição das estrelas, que servirão de base para a interpretação das estruturas identificadas na análise cinemática. Este perfil de brilho foi obtido a partir da parte simétrica da imagem de aquisição na filtro  $r$  (Figura 5.2), para observações realizadas pelo telescópio Gemini-Sul em Setembro de 2011, pelo programa GS-2011B-Q-61.

O perfil de brilho foi produzido pelo ajuste de elipses às isofotas da imagem, através da rotina *ellipse* do IRAF. Deste ajuste deduzimos a inclinação do disco da AM2306-721A com relação ao plano do céu, chegando ao valor de  $57^\circ$ . Este resultado será utilizado mais tarde nos ajustes cinemáticos.

A curva de luz produzida pela rotina *ellipse* foi ajustada com uma série de elementos: um disco, um bojo, dois anéis e uma barra. As formas analíticas para cada um destes componentes estão dadas na tabela 5.1. O ajuste foi simultâneo para todos os parâmetros, ou seja, a função resultante possui 13 parâmetros livres. Contudo o problema não é degenerado, pois todas as funções são linearmente independentes.

O perfil de brilho em função do semieixo maior das isofotas elipsoidais é apresentado na figura 5.3. Neste gráfico cada componente é apresentado como uma linha colorida, os pontos verdes marcam os dados e a linha preta representa a soma de todas as componentes.

---

<sup>1</sup>Apesar de esta galáxia pertencer a um par em interação utilizaremos o seu *redshift* como indicador de distância, o que leva a  $D = 120 \pm 8 \text{ Mpc}$ . Esta distância é muito semelhante aos  $105 \text{ Mpc}$  derivados por Springob et al. (2009) usando a relação Tully-Fisher

## *APÊNDICE C -- Artigos de colaborações*

Através de uma colaboração, parte da análise do toroide da galáxia Mrk 3 foi incorporada ao artigo Sales et al. (2014), que reproduzo abaixo. Além deste, Outras colaborações paralelas a esta tese resultaram nos seguintes artigos:

- Riffel et al. (2014): Differences between CO- and calcium triplet-derived velocity dispersions in spiral galaxies: evidence for central star formation?
- Mason et al. (2015): The nuclear near-infrared spectral properties of nearby galaxies
- González-Martín et al. (2015): Nuclear obscuration in LINERs
- Riffel et al. (2015): The stellar spectral features of nearby galaxies in the near infrared: tracers of thermally pulsing asymptotic giant branch stars?

## *Referências Bibliográficas*

- ALLAMANDOLA, L. J.; TIELENS, G. G. M.; BARKER, J. R. Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons - The infrared emission bands, the excitation/emission mechanism, and the astrophysical implications. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 71, p. 733, dez. 1989.
- ANTONUCCI, R. Unified Models for Active Galactic Nuclei and Quasars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 31, n. 1, p. 473–521, set. 1993.
- ANTONUCCI, R. R. J.; MILLER, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. *The Astrophysical Journal*, v. 297, p. 621, out. 1985.
- ASMUS, D. et al. The subarcsecond mid-infrared view of local active galactic nuclei - I. The N- and Q-band imaging atlas. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 439, n. 2, p. 1648–1679, fev. 2014.
- AWAKI, H. et al. Wide-Band Spectroscopy of the Compton Thick Seyfert2 Galaxy Markarian 3 with Suzaku. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2008.
- AWAKI, H. et al. Detection of Hard X-Rays from the Compton-Thick Seyfert 2 Galaxy NGC 2273 with Suzaku. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 61, n. sp1, p. S317–S325, jan. 2009.
- BARVAINIS, R. Hot dust and the near-infrared bump in the continuum spectra of quasars and active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, v. 320, p. 537, set. 1987.
- BERTOLA, F. et al. Testing the gravitational field in elliptical galaxies - NGC 5077. *The Astrophysical Journal*, v. 373, p. 369, jun. 1991.
- BIANCHI, S. et al. CAIXA: a catalogue of AGN in the XMM-Newton archive. *Astronomy and Astrophysics*, v. 495, n. 2, p. 421–430, fev. 2009.
- BIANCHI, S. et al. The origin of the iron lines in NGC7213. *Astronomy and Astrophysics*, v. 407, n. 2, p. L21–L24, ago. 2003.
- BONATTO, C. J.; PASTORIZA, M. G. The nuclear region of NGC 7469. *The Astrophysical Journal*, v. 353, p. 445, abr. 1990.
- BRANDL, B. R. et al. High resolution IR observations of the starburst ring in NGC 7552. *Astronomy & Astrophysics*, v. 543, p. A61, jun. 2012.
- BREGMAN, J.; TEMI, P. Variations of the Mid-Infrared Emission Spectrum in Reflection Nebulae. *The Astrophysical Journal*, v. 621, n. 2, p. 831–838, mar. 2005.

- BRIGHTMAN, M.; NANDRA, K. An XMM-Newton spectral survey of 12  $\mu\text{m}$  selected galaxies - I. X-ray data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 413, n. 2, p. 1206–1235, maio 2011.
- BROCKLEHURST, M. Calculations of level populations for the low levels of hydrogenic ions in gaseous nebulae. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1971.
- BURTSCHER, L. et al. A diversity of dusty AGN tori. *Astronomy & Astrophysics*, v. 558, p. A149, out. 2013.
- BUTA, R. The Morphology of Barred Galaxies. *Barred galaxies. Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, v. 91, 1996.
- CALZETTI, D. et al. The Calibration of Mid-Infrared Star Formation Rate Indicators. *The Astrophysical Journal*, v. 666, n. 2, p. 870–895, set. 2007.
- CAPETTI, A. et al. The Morphology of the Narrow-Line Region of Markarian 3. *The Astrophysical Journal*, v. 448, p. 600, ago. 1995.
- CAPPELLARI, M.; COPIN, Y. Adaptive spatial binning of integral-field spectroscopic data using Voronoi tessellations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 342, n. 2, p. 345–354, jun. 2003.
- Cid Fernandes, R. et al. Empirical Diagnostics of the Starburst-AGN Connection. *The Astrophysical Journal*, v. 558, n. 1, p. 81–108, set. 2001.
- COMASTRI, A.; FIORE, F. The Density and Masses of Obscured Black Holes. *Astrophysics and Space Science*, v. 294, n. 1-2, p. 63–69, nov. 2004.
- COPETTI, M. V. F.; PASTORIZA, M. G.; DOTTORI, H. A. H II region age indicators. *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, v. 156, p. 111–120, 1986.
- CORRAL, A. et al. The X-ray spectral properties of the AGN population in the XMM-Newton bright serendipitous survey. *Astronomy & Astrophysics*, v. 530, p. A42, maio 2011.
- DAVIES, R. I. et al. A Close Look at Star Formation around Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal*, v. 671, n. 2, p. 1388–1412, dez. 2007.
- De Buizer, J.; FISHER, R. *High Resolution Infrared Spectroscopy in Astronomy*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 84–87 p. (ESO Astrophysics Symposia). ISBN 3-540-25256-8.
- DIAMOND-STANIC, A. M.; RIEKE, G. H. The relationship between black hole growth and star formation in Seyfert galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 746, n. 2, p. 168, fev. 2012.
- DIEDENHOVEN, B. van et al. The Profiles of the 3–12 Micron Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Features. *The Astrophysical Journal*, v. 611, n. 2, p. 928–939, ago. 2004.
- DOKKUM, P. G. van. Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 113, n. 789, p. 1420–1427, nov. 2001.

- DONZELLI, C. J.; PASTORIZA, M. G. Optical Spectroscopic Properties of a Sample of Interacting Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 111, n. 1, p. 181–201, jul. 1997.
- DORS, O. L. et al. Ages and metallicities of circumnuclear star formation regions from Gemini IFU observations. *Astronomy and Astrophysics*, v. 482, n. 1, p. 59–65, abr. 2008.
- DOTTORI, H. A.; PASTORIZA, M. G. A comparative study of the stellar content in normal and active nuclei of spiral galaxies. *Astrophysics and Space Science*, v. 121, n. 1, p. 147–160, 1986.
- ELITZUR, M. ON THE UNIFICATION OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI. *The Astrophysical Journal*, v. 747, n. 2, p. L33, mar. 2012.
- ESQUEJ, P. et al. Nuclear star formation activity and black hole accretion in nearby seyfert galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 780, n. 1, p. 86, jan. 2014.
- FAZIO, G. G. et al. The Infrared Array Camera (IRAC) for the Spitzer Space Telescope. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 154, n. 1, p. 10–17, set. 2004.
- FELTRE, A. et al. Smooth and clumpy dust distributions in AGN: a direct comparison of two commonly explored infrared emission models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 426, n. 1, p. 120–127, out. 2012.
- FERRARESE, L.; MERRITT, D. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 539, n. 1, p. L9–L12, ago. 2000.
- FILIPPENKO, A. V.; HALPERN, J. P. NGC 7213 - A key to the nature of liners? *The Astrophysical Journal*, v. 285, p. 458, out. 1984.
- FREEMAN, K. C. Structure and Evolution of Barred Spiral Galaxies, I. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 133, p. 47–62, 1966.
- FREEMAN, K. C. On the Disks of Spiral and so Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 160, p. 811, jun. 1970.
- FRITZ, J.; FRANCESCHINI, A.; HATZIMINAOGLOU, E. Revisiting the infrared spectra of active galactic nuclei with a new torus emission model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 366, n. 3, p. 767–786, jan. 2006.
- GALLIANO, F. et al. Variations of the Mid-IR Aromatic Features inside and among Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 679, n. 1, p. 310–345, maio 2008.
- GALLIMORE, J. F. et al. Infrared spectral energy distributions of Seyfert galaxies: Spitzer space telescope observations of the 12  $\mu\text{m}$  sample of active galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 187, n. 1, p. 172–211, mar. 2010.
- GEBHARDT, K. et al. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. *The Astrophysical Journal*, v. 539, n. 1, p. L13–L16, ago. 2000.
- GHISELLINI, G.; HAARDT, F.; MATT, G. The Contribution of the Obscuring Torus to the X-Ray Spectrum of Seyfert Galaxies - a Test for the Unification Model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 267, 1994.



- GILLETT, F. C.; FORREST, W. J.; MERRILL, K. M. 8-13 micron spectra of NGC 7027, BD +30 3639 and NGC 6572. *The Astrophysical Journal*, v. 183, p. 87, jul. 1973.
- GIVEON, U. et al. The Excitation and Metallicity of Galactic H ii Regions from Infrared Space Observatory SWS Observations of Mid-Infrared Fine-Structure Lines. *The Astrophysical Journal*, v. 566, n. 2, p. 880–897, fev. 2002.
- GONZÁLEZ-DELGADO, R. M.; PÉREZ, E. Star formation and AGN. *Astrophysics and Space Science*, v. 205, n. 1, p. 127–134, 1993.
- GONZÁLEZ-MARTÍN, O. et al. Synapses of active galactic nuclei:. *Astronomy & Astrophysics*, v. 567, p. A92, jul. 2014.
- GONZÁLEZ-MARTÍN, O. et al. X-ray nature of the LINER nuclear sources. *Astronomy and Astrophysics*, v. 460, n. 1, p. 45–57, dez. 2006.
- GONZÁLEZ-MARTÍN, O. et al. Nuclear obscuration in LINERs. *Astronomy & Astrophysics*, v. 578, p. A74, jun. 2015.
- GONZÁLEZ-MARTÍN, O. et al. Dust in active galactic nuclei. *Astronomy & Astrophysics*, v. 553, p. A35, abr. 2013.
- GONZÁLEZ-MARTÍN, O.; VAUGHAN, S. X-ray variability of 104 active galactic nuclei. *Astronomy & Astrophysics*, v. 544, p. A80, ago. 2012.
- GRAHAM, A. W. et al. A Correlation between Galaxy Light Concentration and Supermassive Black Hole Mass. *The Astrophysical Journal*, v. 563, n. 1, p. L11–L14, dez. 2001.
- GRANATO, G. L.; DANESE, L. Thick Tori around Active Galactic Nuclei - a Comparison of Model Predictions with Observations of the Infrared Continuum and Silicate Features. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 268, 1994.
- GRANATO, G. L.; DANESE, L.; FRANCESCHINI, A. Thick Tori around Active Galactic Nuclei: The Case for Extended Tori and Consequences for Their X-Ray and Infrared Emission. *The Astrophysical Journal*, v. 486, n. 1, p. 147–159, set. 1997.
- GREENHILL, L. J.; TILAK, A.; MADEJSKI, G. Prevalence of High X-Ray Obscuring Columns among AGNs that Host H 2 O Masers. *The Astrophysical Journal*, v. 686, n. 1, p. L13–L16, out. 2008.
- HAO, L. et al. The Distribution of Silicate Strength in Spitzer Spectra of AGNs and ULIRGs. *The Astrophysical Journal*, v. 655, n. 2, p. L77–L80, fev. 2007.
- HELOU, G. et al. The Anatomy of Star Formation in NGC 300. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 154, n. 1, p. 253–258, set. 2004.
- HERNQUIST, L.; MIHOS, J. C. Excitation of Activity in Galaxies by Minor Mergers. *The Astrophysical Journal*, v. 448, p. 41, jul. 1995.
- HO, L. C.; FILIPPENKO, A. V.; SARGENT, W. L. W. A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 112, n. 2, p. 315–390, out. 1997.

- HO, L. C.; KETO, E. The Mid-Infrared Fine-Structure Lines of Neon as an Indicator of Star Formation Rate in Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 658, n. 1, p. 314–318, mar. 2007.
- HÖNIG, S. F. et al. Parsec-scale dust emission from the polar region in the type 2 nucleus of NGC 424. *The Astrophysical Journal*, v. 755, n. 2, p. 149, ago. 2012.
- HÖNIG, S. F. et al. Dust in the polar region as a major contributor to the infrared emission of active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, v. 771, n. 2, p. 87, jul. 2013.
- HOPKINS, P. F.; QUATAERT, E. How do massive black holes get their gas? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 407, n. 3, p. 1529–1564, set. 2010.
- HOUCK, J. R. et al. The Infrared Spectrograph (IRS) on the Spitzer Space Telescope. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 154, n. 1, p. 18–24, set. 2004.
- IMANISHI, M. 3–4 Micron Spectroscopy of Seyfert 2 Nuclei to Quantitatively Assess the Energetic Importance of Compact Nuclear Starbursts. *The Astrophysical Journal*, v. 569, n. 1, p. 44–53, abr. 2002.
- IMANISHI, M.; DUDLEY, C. C. Energy Diagnoses of Nine Infrared Luminous Galaxies Based on 3–4 Micron Spectra. *The Astrophysical Journal*, v. 545, n. 2, p. 701–711, dez. 2000.
- JAFFE, W. et al. The central dusty torus in the active nucleus of NGC 1068. *Nature*, v. 429, n. 6987, p. 47–9, maio 2004.
- KAUFFMANN, G. et al. The host galaxies of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 346, n. 4, p. 1055–1077, dez. 2003.
- KAWAKATU, N.; WADA, K. Coevolution of Supermassive Black Holes and Circumnuclear Disks. *The Astrophysical Journal*, v. 681, n. 1, p. 73–83, jul. 2008.
- KEEL, W. C. Rotation Curves and Velocity Measures for Spiral Galaxies in Pairs. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 106, p. 27, set. 1996.
- KEEL, W. C. et al. HST imaging of fading AGN candidates. I. Host galaxy properties and origin of the extended gas. *The Astronomical Journal*, v. 149, n. 5, p. 155, abr. 2015.
- KENNICUTT, J. The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 498, n. 2, p. 541–552, maio 1998.
- KENNICUTT, R. C. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 36, n. 1, p. 189–231, set. 1998.
- KEWLEY, L. J. et al. Theoretical Modeling of Starburst Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 556, n. 1, p. 121–140, jul. 2001.
- KHACHIKIAN, E. Y.; WEEDMAN, D. W. An atlas of Seyfert galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 192, p. 581, set. 1974.
- KORMENDY, J.; RICHSTONE, D. Inward Bound—The Search for Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 33, n. 1, p. 581–624, set. 1995.

- KRABBE, A. C. et al. Kinematics and physical properties of southern interacting galaxies: the minor merger AM 2306-721. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 389, n. 4, p. 1593–1604, out. 2008.
- KROLIK, J. H.; BEGELMAN, M. C. Molecular tori in Seyfert galaxies - Feeding the monster and hiding it. *The Astrophysical Journal*, v. 329, p. 702, jun. 1988.
- La Massa, S. M.; HECKMAN, T. M.; PTAK, A. Disentangling AGN and star formation in soft X-Rays. *The Astrophysical Journal*, v. 758, n. 2, p. 82, out. 2012.
- LAMASSA, S. M. et al. On the star formation-AGN connection at  $z \lesssim 0.3$ . *The Astrophysical Journal*, v. 765, n. 2, p. L33, mar. 2013.
- LANG, M.; HOLLEY-BOCKELMANN, K.; SINHA, M. BAR FORMATION FROM GALAXY FLYBYS. *The Astrophysical Journal*, v. 790, n. 2, p. L33, ago. 2014.
- LEGER, A.; PUGET, J. L. Identification of the 'unidentified' IR emission features of interstellar dust? *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, v. 137, 1984.
- LEITHERER, C. et al. Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 123, n. 1, p. 3–40, jul. 1999.
- LÓPEZ-GONZAGA, N. et al. Revealing the large nuclear dust structures in NGC 1068 with MIDI/VLTI. *Astronomy & Astrophysics*, v. 565, p. A71, maio 2014.
- LYNDEN-BELL, D.; KALNAJS, A. J. On the generating mechanism of spiral structure. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 157, 1972.
- MAGORRIAN, J. et al. The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers. *The Astronomical Journal*, v. 115, n. 6, p. 2285–2305, jun. 1998.
- MAIOLINO, R. et al. Heavy obscuration in X-ray weak AGNs. *Astronomy and Astrophysics*, 1998.
- MARCONI, A. et al. Local supermassive black holes, relics of active galactic nuclei and the X-ray background. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 351, n. 1, p. 169–185, jun. 2004.
- MARINUCCI, A. et al. The link between the hidden broad line region and the accretion rate in Seyfert 2 galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 748, n. 2, p. 130, abr. 2012.
- MARTÍN-HERNÁNDEZ, N. L. et al. ISO spectroscopy of compact H ii regions in the Galaxy. II. Ionization and elemental abundances. *Astronomy and Astrophysics*, v. 381, n. 2, p. 606–627, jan. 2002.
- MASON, R. E. et al. Spatially Resolved Mid-Infrared Spectroscopy of NGC 1068: The Nature and Distribution of the Nuclear Material. *The Astrophysical Journal*, v. 640, n. 2, p. 612–624, abr. 2006.
- MASON, R. E. et al. The nuclear near-infrared spectral properties of nearby galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 217, n. 1, p. 13, mar. 2015.
- MILLER, J. S.; GOODRICH, R. W. Spectropolarimetry of high-polarization Seyfert 2 galaxies and unified Seyfert theories. *The Astrophysical Journal*, v. 355, p. 456, jun. 1990.

- MIZUTANI, K.; SUTO, H.; MAIHARA, T. 3.3 micron emission feature in infrared galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 421, p. 475, fev. 1994.
- Muñoz Marín, V. M. et al. An Atlas of the Circumnuclear Regions of 75 Seyfert Galaxies in the Near-Ultraviolet with the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys. *The Astronomical Journal*, v. 134, n. 2, p. 648–667, ago. 2007.
- MÜLLER-SÁNCHEZ, F. et al. The stellar kinematic center and the true galactic nucleus of NGC 253. *The Astrophysical Journal*, v. 716, n. 2, p. 1166–1177, jun. 2010.
- NANDRA, K. et al. An XMM-Newton survey of broad iron lines in Seyfert galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 382, n. 1, p. 194–228, nov. 2007.
- NEISTEIN, E.; NETZER, H. What triggers black hole growth? Insights from star formation rates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 437, n. 4, p. 3373–3384, fev. 2014.
- NENKOVA, M.; IVEZIĆ, v.; ELITZUR, M. Dust Emission from Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal*, v. 570, n. 1, p. L9–L12, maio 2002.
- NENKOVA, M. et al. AGN Dusty Tori. I. Handling of Clumpy Media. *The Astrophysical Journal*, v. 685, n. 1, p. 147–159, set. 2008.
- NENKOVA, M. et al. AGN Dusty Tori. II. Observational Implications of Clumpiness. *The Astrophysical Journal*, v. 685, n. 1, p. 160–180, set. 2008.
- NOVAK, G. S.; OSTRIKER, J. P.; CIOTTI, L. Feedback from central black holes in elliptical galaxies: two dimensional models compared to one-dimensional models. *The Astrophysical Journal*, v. 737, n. 1, p. 26, ago. 2011.
- PASTORIZA, M. G.; DONZELLI, C. J.; BONATTO, C. Nuclear activity and stellar population of a sample of interacting galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 1999.
- PICONCELLI, E. et al. X-ray spectroscopy of the Compton-thick Seyfert 2 ESO 138 - G1. *Astronomy & Astrophysics*, v. 534, p. A126, out. 2011.
- PIER, E. A.; KROLIK, J. H. Infrared spectra of obscuring dust tori around active galactic nuclei. I - Computational method and basic trends. *The Astrophysical Journal*, v. 401, p. 99, dez. 1992.
- PIER, E. A.; KROLIK, J. H. Infrared Spectra of Obscuring Dust Tori around Active Galactic Nuclei. II. Comparison with Observations. *The Astrophysical Journal*, v. 418, p. 673, dez. 1993.
- RAMOS, a. A.; ALMEIDA, C. R. BayesCLUMPY: Bayesian Inference with Clumpy Dusty Torus Models. *The Astrophysical Journal*, v. 696, n. 2, p. 12, maio 2009.
- Ramos Almeida, C. et al. Resolving the nuclear dust distribution of the Seyfert 2 galaxy NGC 3081. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, v. 417, n. 1, p. L46–L50, out. 2011.

- RICKES, M. G.; PASTORIZA, M. G.; BONATTO, C. Star formation, metallicity gradient and ionized gas: clues to the formation of the elliptical galaxies NGC 6868 and 5903. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 384, n. 4, p. 1427–1436, mar. 2008.
- RIEKE, G. H. et al. Determining star formation rates for infrared galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 692, n. 1, p. 556–573, fev. 2009.
- RIFFEL, R. et al. The stellar spectral features of nearby galaxies in the near infrared: tracers of thermally pulsing asymptotic giant branch stars? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 450, n. 3, p. 3069–3079, maio 2015.
- RIFFEL, R. et al. The First Detection of Near-Infrared CN Bands in Active Galactic Nuclei: Signature of Star Formation. *The Astrophysical Journal*, v. 659, n. 2, p. L103–L106, abr. 2007.
- RIFFEL, R. et al. Probing the near-infrared stellar population of Seyfert galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 400, n. 1, p. 273–290, nov. 2009.
- RIFFEL, R.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; PASTORIZA, M. G. A 0.8–2.4  $\mu\text{m}$  spectral atlas of active galactic nuclei. *Astronomy and Astrophysics*, v. 457, n. 1, p. 61–70, out. 2006.
- RIFFEL, R. A. et al. Differences between CO- and calcium triplet-derived velocity dispersions in spiral galaxies: evidence for central star formation? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 446, n. 3, p. 2823–2836, nov. 2014.
- RODRIGUEZ-ARDILA, A.; MAZZALAY, X. The near-infrared spectrum of Mrk 1239: direct evidence of the dusty torus? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, v. 367, n. 1, p. L57–L61, mar. 2006.
- RODRIGUEZ-ARDILA, A.; VIEGAS, S. M. Hidden starbursts in Seyfert 1 galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 340, n. 4, p. L33–L37, abr. 2003.
- Rodriguez Espinosa, J. M.; RUDY, R. J.; JONES, B. Star formation in Seyfert galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 312, p. 555, jan. 1987.
- ROSA, D. A. et al. Interaction effects on galaxy pairs with Gemini/GMOS - II: oxygen abundance gradients. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 444, n. 3, p. 2005–2021, set. 2014.
- ROSARIO, D. et al. The mean star formation rate of X-ray selected active galaxies and its evolution from  $z \sim 2.5$ : results from PEP- Herschel. *Astronomy & Astrophysics*, v. 545, p. A45, set. 2012.
- ROSSA, J.; DIETRICH, M.; WAGNER, S. Kinematics and morphology of the Narrow-Line Region in the Seyfert galaxy NGC1386. *Astronomy & Astrophysics*, v. 362, p. 501–508, 2000.
- RUSH, B.; MALKAN, M. A.; SPINOGLIO, L. The extended 12 micron galaxy sample. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 89, p. 1, nov. 1993.

- SALES, D. a.; PASTORIZA, M. G.; RIFFEL, R. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Emission Line Ratios in Active Galactic Nuclei and Starburst Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 725, n. 1, p. 605–614, dez. 2010.
- SALES, D. a. et al. The Compton-thick Seyfert 2 nucleus of NGC 3281: torus constraints from the 9.7  $\mu\text{m}$  silicate absorption. *The Astrophysical Journal*, v. 738, n. 1, p. 109, set. 2011.
- SALES, D. a. et al. High spatial resolution of the mid-infrared emission of the Compton-thick type 2 Seyfert galaxy, Markarian 3. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 441, n. 1, p. 630–639, maio 2014.
- SANDAGE, A. Optical redshifts for 719 bright galaxies. *The Astronomical Journal*, v. 83, p. 904, ago. 1978.
- SCHAWINSKI, K. et al. Active galactic nuclei flicker: an observational estimate of the duration of black hole growth phases of  $\sim 10^5$  yr. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 451, n. 3, p. 2517–2523, jun. 2015.
- SCHIMOIA, J. S. et al. Short time-scale monitoring of the X-Ray, UV, and broad double-peak emission line of the nucleus of NGC 1097. *The Astrophysical Journal*, v. 800, n. 1, p. 63, fev. 2015.
- SCHNORR-MÜLLER, A. et al. Gas inflows towards the nucleus of the active galaxy NGC 7213. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 438, n. 4, p. 3322–3331, jan. 2014.
- SÉRSIC, J. L. Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía*, v. 6, 1963.
- SHINOZAKI, K. et al. Spectral Statistics and Local Luminosity Function of a Complete Hard X-Ray Sample of the Brightest Active Galactic Nuclei. *The Astronomical Journal*, v. 131, n. 6, p. 2843–2858, jun. 2006.
- SHU, X. W.; YAQOOB, T.; WANG, J. X. Chandra high-energy grating observations of the Fe K alpha line core in type II Seyfert galaxies: a comparison with type I nuclei. *The Astrophysical Journal*, v. 738, n. 2, p. 147, set. 2011.
- SIEBENMORGEN, R. et al. Discovery of 10  $\mu\text{m}$  silicate emission in quasars. *Astronomy and Astrophysics*, v. 436, n. 1, p. L5–L8, jun. 2005.
- SIEBENMORGEN, R.; KRÜGEL, E.; SPOON, H. W. W. Mid-infrared emission of galactic nuclei. *Astronomy and Astrophysics*, v. 414, n. 1, p. 123–139, jan. 2004.
- SILVERMAN, J. D. et al. The Luminosity Function of X-Ray-selected Active Galactic Nuclei: Evolution of Supermassive Black Holes at High Redshift. *The Astrophysical Journal*, v. 679, n. 1, p. 118–139, maio 2008.
- SMITH, A. J. D. T. et al. Spectral Mapping Reconstruction of Extended Sources. v. 119, p. 1133–1144, 2007.

- SMITH, J. D. T. et al. The Mid-Infrared Spectrum of Star-forming Galaxies: Global Properties of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emission. *The Astrophysical Journal*, v. 656, n. 2, p. 770–791, fev. 2007.
- SPOON, H. W. W. et al. Mid-Infrared Galaxy Classification Based on Silicate Obscuration and PAH Equivalent Width. *The Astrophysical Journal*, v. 654, n. 1, p. L49–L52, jan. 2007.
- SPRINGOB, C. M. et al. Erratum: "SFI++. II. A new I-Band Tully-Fisher catalog, derivation of peculiar velocities and data set properties"(2007, ApJS, 172, 599). *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 182, n. 1, p. 474–475, maio 2009.
- STORCHI-BERGMANN, T. et al. Evidence of a Starburst within 9 Parsecs of the Active Nucleus of NGC 1097. *The Astrophysical Journal*, v. 624, n. 1, p. L13–L16, maio 2005.
- STORCHI-BERGMANN, T. et al. The Frequency of Nuclear Star Formation in Seyfert 2 Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 544, n. 2, p. 747–762, dez. 2000.
- STORCHI-BERGMANN, T. et al. Circumnuclear Star Formation in Active Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 472, n. 1, p. 83–101, nov. 1996.
- TELESCO, C. M. et al. GairCam: Gemini mid-infrared imager. *Proc. SPIE Vol. 3354*, v. 3354, p. 534–544, 1998.
- TIELENS, A. Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Molecules\*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 46, n. 1, p. 289–337, set. 2008.
- TIELENS, A. G. G. M. The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium. *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*, 2005.
- TODY, D. The IRAF Data Reduction and Analysis System. *IN: Instrumentation in astronomy VI; Proceedings of the Meeting*, 1986.
- TODY, D. IRAF in the Nineties. *Astronomical Data Analysis Software and Systems II*, v. 52, 1993.
- TRAN, H. D. The Nature of Seyfert 2 Galaxies with Obscured Broad-Line Regions. III. Interpretation. *The Astrophysical Journal*, v. 440, p. 597, fev. 1995.
- TRISTRAM, K. R. W. et al. The dusty torus in the Circinus galaxy: a dense disk and the torus funnel. *Astronomy & Astrophysics*, v. 563, p. A82, mar. 2014.
- TRISTRAM, K. R. W. et al. Resolving the complex structure of the dust torus in the active nucleus of the Circinus galaxy. *Astronomy and Astrophysics*, v. 474, n. 3, p. 837–850, nov. 2007.
- TRISTRAM, K. R. W. et al. The complexity of parsec-scaled dusty tori in AGN. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 372, n. 1, p. 012035, jul. 2012.
- TULLY, R. B. The galaxy luminosity function and environmental dependencies. *The Astronomical Journal*, v. 96, p. 73, jul. 1988.

- UEDA, Y. et al. Revisit of Local X-Ray Luminosity Function of Active Galactic Nuclei with the MAXI Extragalactic Survey. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 63, n. sp3, p. S937–S945, nov. 2011.
- UEDA, Y. et al. The ASCA Medium Sensitivity Survey (The GIS Catalog Project): Source Catalog II. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 161, n. 2, p. 185–223, dez. 2005.
- URRY, C. M.; PADOVANI, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 107, p. 803, set. 1995.
- VAUCOULEURS, G. H. de; VAUCOULEURS, A. de; SHAPLEY, H. Reference catalogue of bright galaxies. *University of Texas Monographs in Astronomy*, 1964.
- VÉRON-CETTY, M.-P.; VÉRON, P. A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition. *Astronomy and Astrophysics*, v. 518, p. A10, ago. 2010.
- VERSTRAETE, L. et al. The Aromatic Infrared Bands as seen by ISO-SWS: Probing the PAH model. *Astronomy and Astrophysics*, v. 372, n. 3, p. 981–997, jun. 2001.
- VOLONTERI, M. et al. Growing black holes and galaxies: black hole accretion versus star formation rate. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 449, n. 2, p. 1470–1485, mar. 2015.
- WEAVER, K. A. K.; WILSON, A. S.; BALDWIN, J. A. J. Kinematics and ionization of extended gas in active galaxies. VI-The Seyfert 2 galaxy NGC 1386. *The Astrophysical Journal*, v. 366, p. 50–63, jan. 1991.
- WEIGELT, G. et al. Diffraction-limited bispectrum speckle interferometry of the nuclear region of the Seyfert galaxy NGC 1068 in the H and K' bands. *Astronomy and Astrophysics*, v. 425, n. 1, p. 77–87, out. 2004.
- WILLNER, S. P.; NELSON-PATEL, K. Neon Abundances in the H II Regions of M33. *The Astrophysical Journal*, v. 568, n. 2, p. 679–688, abr. 2002.
- WINTER, L. M. et al. X-Ray spectral properties of the BAT AGN sample. *The Astrophysical Journal*, v. 690, n. 2, p. 1322–1349, jan. 2009.
- WU, H. et al. PAH and Mid-Infrared Luminosities as Measures of Star Formation Rate in Spitzer First Look Survey Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 632, n. 2, p. L79–L82, out. 2005.
- WU, X.-B. et al. An ultraluminous quasar with a twelve-billion-solar-mass black hole at redshift 6.30. *Nature*, v. 518, n. 7540, p. 512–5, fev. 2015.
- WU, Y. et al. Spitzer/IRS 5–35  $\mu\text{m}$  Low-resolution spectroscopy of the 12  $\mu\text{m}$  Seyfert sample. *The Astrophysical Journal*, v. 701, n. 1, p. 658–676, ago. 2009.
- WUTSCHIK, S.; SCHLEICHER, D. R. G.; PALMER, T. S. Star formation and accretion in the circumnuclear disks of active galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, v. 560, p. A34, dez. 2013.