

Universidade Federal do Rio Grande  
Instituto Matemática, Estatística e Física  
Programa de Pós-graduação em Física

Waldas da Silva Oliveira

**Estudo no Infravermelho Próximo de  
Galáxias com Emissão de megaMASER de  
OH**

Rio Grande

2019



Walas da Silva Oliveira

**Estudo no Infravermelho Próximo de  
Galáxias com Emissão de megaMASER de  
OH**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física do Instituto Matemática, Estatística e Física da Universidade Federal do Rio Grande como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física.

Área de Concentração: Astronomia

Orientadora: Profa. Dra. Dinalva A. Sales

Rio Grande

2019



*Este trabalho é dedicado de forma especial à toda minha família.*

*Dedico ainda:*

*à população negra, principalmente a periférica que mesmo com uma jornada de trabalho desgastante enfrenta diariamente com cabeça erguida o descaso, a violência e o preconceito;*  
*à todas as minorias que: Juntos somos mais forte do que qualquer preconceito;*  
*por fim, à todos que lutam contra a onda de desinformação, preconceito e intolerância que assola nosso país.*



# Agradecimentos

Primeiramente sou grato à minha família que de diversas formas foram inspiração para continuar a trabalhar duro e incentivar as adversidades. O incentivo e a ajuda que vocês me deram em toda minha carreira acadêmica e quando iniciei minha jornada no extremo Sul do país foi fantástico, esse título não é só meu é de vocês também obrigado por tudo.

Aos amigos de Vitória da Conquista, vocês são fantásticos não poderei nomear a todos neste texto, mas alguns são importante frisar, Magno cuja conversas foram essenciais na minha escolha de graduação. Os professores, Luizdarcy e Jorge Anderson, que sempre me incentivaram a seguir para o mestrado. A Augusto e Celcina, grandes amigos da graduação que também vieram desbravar o Sul. E a Caroline, Jamile, Paulo, Priscilla e William.

Sou grato ao meus amigos da pós Calígula, Daniele, Felipe, Laura, Pedro, Taneo, em especial à John e Geferson que me salvaram por diversas vezes com o python, linux e afins. As minhas grandes companheiras de orientação, viagens e reuniões, Brenda e Lara, aprendi e me diverti bastante com vocês. Agradeço os amigos que não compunham a PPG mas foram de grande valia e me fizeram me sentir em casa, a toda galera do AstroEsul foi uma honra dividir a M07 com vocês, a Fabiana, Fabiele, Lucas, Manuel, Matheus, Pablo e Thais vocês são pessoas fantásticas. Aos professores da PPG-física Bernal, Cristiano, Fabricio, João Thiago, Jorge, Matheus e Stavros.

Um agradecimento em especial para a pessoa que mesmo sem me conhecer confiou em mim e me aceitou como orientando, obrigado Dinalva sou eternamente grato a você por aceitar ser minha guia no mundo da astrofísica.

Por fim, a FURG pela infraestrutura fornecida, a CAPES subsídio recebido e o Governo brasileiro pela educação pública gratuita a qual utilizei grande parte da minha carreira acadêmica.



*“Irmão, você não percebeu que você é o único representante do seu sonho na face da terra? Se isso não fizer você correr, chapa, eu não sei o que vai”*

Emicida

*“Fogo nos racistas”*

Djonga



# Resumo

Galaxias Megamaser de OH (OHMGs), um subconjunto de Galaxias Ultra Luminosas no Infravermelho (ULIRGs), são de particular interesse porque podem representar uma fase crítica de transição de curta duração ligada ao início do rápido abastecimento de combustível nuclear, que por sua vez leva ao desenvolvimento de um disco de gás circum-nuclear e o início de ventos do tipo Nucleo Ativo de Galáxias (AGN) ou Starburst. Neste estudo, possuindo como objetivo classificar a partir da atividade nuclear uma pequena amostra de OHMGs, bem como realizar um mapeamento das linhas de emissão mais comuns nessa amostra, apresentamos dados espectroscópicos NIR de 9 OHMGs dos quais 5 foram observadas usando o espectrógrafo NASA Infrared Telescope Facility (IRTF) / SpeX no modo dispersão cruzada e 4 foram observados usando William Herschel Telescope (WHT) / LIRIS, ambas as observações cobriram a faixa no intervalo de 0,8 a 2,4 $\mu$ m. A amostra, composta por 44% de galáxias Seyfert e 33% de galáxias Starburst, apresentou em sua maioria a emissão de linhas moleculares de H<sub>2</sub> além de linhas como H<sub>I</sub>, HeI, HeII, [SII], [FeII], notou-se também a presença de linhas com alto potencial de ionização como [Si x] e [Si VI], estas linhas são sinais claros de atividade nuclear. A amostra apresenta linhas de absorção de Na I e CO, que estão correlacionadas com a população de gigantes (super) vermelhas. Por fim, foi possível separar algumas OHMGs da amostra a partir de razões de linhas de recombinação do Hidrogênio, com isso conseguimos detectar e diferenciar 3 objetos a partir de taxa de formação estelar.



# Abstract

OHMGs, a subset of Ultra Luminous Infrared Galaxies (ULIRGs), are of particular interest because they may represent a critical short-term transition phase linked to the early rapid delivery of nuclear fuel, which in turn leads to the development of a circum-nuclear gas disc and the beginning of Active galactic Nuclei (AGN) or Starburst. In this study, with the objective of classifying from the nuclear activity a small sample of OHMGs, as well as to perform a mapping of the most common emission lines in this sample, we presented NIR spectroscopic data of 9 OHMGs of which 5 were observed using the NASA Infrared Telescope Spectrograph Facility (IRTF) / SpeX in cross-dispersion mode and 4 were observed using William Harshel Telescope (WHT) / Long-slit Intermediate Resolution Infrared Spectrograph (LIRIS), both observations covered of 0.8 to  $2.4\mu\text{m}$ . The sample, consisting of 44% of Seyfert galaxies and 33% of Starburst galaxies, presented mostly the emission of  $\text{H}_2$  molecular lines in addition to lines such as H I, [Fe II], we also noticed the presence of lines with high ionization potential as [Si II], [Si III] and [Si VI], these lines are clear signs of nuclear activity. The sample shows absorption lines of Na I and CO, which are correlated with the population of red (super) giants. At the end, it was possible to separate some OHMGs from the sample from the Hydrogen recombination lines, thus we were able to detect and differentiate 3 objects from the star formation rate.



# Lista de Figuras

1.1	Modelo Unificado de AGN (fora de escala) . . . . .	24
1.2	Espectro mediano de um QUASAR . . . . .	26
1.3	Contínuos típicos de galáxias Seyfert e Starburst . . . . .	27
1.4	Função de luminosidade, plotadas como densidade espacial versus luminosidade para as amostras de 12, 25, 60 $\mu\text{m}$ (BGS) e 100 $\mu\text{m}$ . A luminosidade é $\nu L_\nu(\lambda)$ , em unidades de luminosidades bolométricas solares. O círculo vermelho destaca a área onde a maior diferença entre as amostras. <b>Créditos:</b> Imagem adaptada de Soifer e Neugebauer (1991) . . . . .	29
1.5	Imagem da galáxia Arp220 capturada pelo telescópio espacial Hubble . . . . .	30
1.6	O diagrama central grande é um gráfico da cor no Infravermelho . . . . .	33
1.7	Sistema com par de galáxias Arp299. Este sistema é formado por duas galáxias em interação a IC 694 e a NGC 3690 <b>Credito:</b> NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University) . . . . .	34
1.8	Cenário evolutivo das ULIRGs . . . . .	35
1.9	Imagem da galaxia IRAS05414 . . . . .	37
1.10	Representação da Largura Equivalente (parte inferior), FWHM (parte superior) e contínuo (linha verde em $y=1$ ) . . . . .	38
2.1	Imagens obtidas com ACS F814W (banda i) . . . . .	42
2.2	Imagens do Hubble de algumas galáxias da amostra . . . . .	42
2.3	Espectrógrafo SpeX instalado no IRTF . . . . .	43
2.4	Imagem do IRTF no monte Muna Kea, Havaí. . . . .	44

2.5	Imagem do William Herschel Telescope localizada na ilha de La Palma, Espanha . . . . .	44
2.6	Espectrográfo LIRIS, instalado no William Herschel Telescope, . . . . .	45
2.7	Espectros NIR da amostra de OHMG . . . . .	48
2.8	Exemplo de ajuste do perfil de linha da IRAS19154+2704 . . . . .	49
2.9	Exemplo de ajuste do perfil de linha da Mrk926 . . . . .	50
3.1	Espectros no NIR das três primeiras galáxias da amostra de OHMG . . . . .	56
3.2	Espectros NIR das três galáxias da amostra de OHMG . . . . .	57
3.3	Espectros NIR das três últimas galáxias da amostra de OHMG . . . . .	58
3.4	histograma mostrando a frequência com a qual aparece linhas de emissão na amostra . . . . .	60
3.5	Espectros unidimensionais de nossa amostra destacando linhas de absorção de CO . . . . .	62
3.6	Diagrama de diagnóstico das razões de linhas $H_2/Br\gamma$ versus $[Fe II]/Br\gamma$ . Diamante, círculo, quadrado, triângulo voltado para cima e triângulo voltado para baixo estão representando as galáxias OHMGs da nossa amostra. Triângulos voltados para a esquerda e direita são galáxias LINERs e LIRGs retiradas de Colina et al. (2015) e Riffel et al. (2013), respectivamente. Asteriscos e símbolos “x” representam galáxias Seyferts 1 e 2 retiradas do trabalho de Riffel et al. (2006). . . . .	63
3.7	Diagrama de diagnóstico baseado no feito por Rodríguez-Ardila et al. (2004). . . . .	65
3.8	Histograma da frequência de classificação da fonte ionizante da amostra de OHMGs. Valores referentes a galáxias Seyfert, Starburst e fontes compostas em porcentagem estão mostradas por barras preta, azul e roxa, respectivamente. . . . .	68

3.9	Diagrama com as razões de linhas de $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ versus $[\text{Fe II}]_{1,2\mu\text{m}}/[\text{Fe II}]_{1,6\mu\text{m}}$ . Os quadrados roxos representam OHMGs da nossa amostra. Círculos fechados e abertos representam galáxias Seyfert 2 e Starburst retiradas de Riffel (2008). Símbolos “x” representam galáxias Seyfert 1 retiradas de Riffel (2008). A linha contínua preta corresponde a uma sequência de avermelhamento de $E(B-V)=0$ (diamante do limite superior) até $E(B-V)=2$ mag. Os diamantes são valores teóricos em passos de $E(B-V)=0.5$ mag. . . . .	69
3.10	Diagrama envolvendo os indicadores de avermelhamento das linhas de H I. As bolas amarelas representam as OHMGs da classe Starburst da nossa amostra. A bola em azul representa a OHMGs Seyfert 2 da nossa amostra. . . . .	70
A.1	Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS01364-1042 . . . . .	88
A.2	Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS03056+2034 . . . . .	89
A.3	Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS04332+0209 . . . . .	90
A.4	Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS05414+5840. . . . .	91
A.5	Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS17526+3253. . . . .	92
A.6	Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS19154+2704. . . . .	93
A.7	Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS23135+2516. . . . .	94
A.8	Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRASF23199+0123. . . . .	95
A.9	Ajustes do perfil de linha da OHMGs Mrk926. . . . .	96



## Lista de Tabelas

2.1	Registro de observação e propriedades galáticas básicas para a amostra. . .	47
3.1	Fluxos derivados em $\mu\text{m}$ das linhas de emissão da amostra de OHMGs. . .	52
3.2	Larguras Equivalentes $\mu\text{m}$ derivadas das linhas de emissão da amostra de OHMGs. . . . .	53
3.3	Largura a meia altura em $\mu\text{m}$ derivadas das linhas de emissão da amostra de OHMGs. . . . .	54
3.4	Contínuo em $\mu\text{m}$ derivado das linhas de emissão da amostra de OHMGs. .	55
3.5	Classificação das galaxias da amostra de OHMGs. . . . .	67
3.6	Avermelhamento derivado para amostra de OHMGs. . . . .	70



# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	21
1.1 Núcleo ativo de galáxias . . . . .	22
1.1.1 Galáxias Seyfert . . . . .	23
1.1.2 Modelo Unificado de AGN . . . . .	24
1.1.3 Quasi stellar objects - QUASARES . . . . .	25
1.2 Galáxias Starburst . . . . .	26
1.3 Galáxias Ultra-Luminosas no Infravermelho . . . . .	28
1.4 Galáxias com Emissão de OH . . . . .	30
1.4.1 Emissão de MASER . . . . .	30
1.4.2 MegaMaser de OH . . . . .	32
1.5 ULIRGs e evolução das Galáxias . . . . .	34
1.5.1 ULIRGs, estágio evolutivo de QUASARES . . . . .	34
1.6 Poeira Interestelar . . . . .	35
1.7 Extinção e Avermelhamento . . . . .	36
1.8 Análise Espectral . . . . .	37
1.9 Motivação e Objetivos . . . . .	39
2. <i>Observação e Tratamento dos Dados</i> . . . . .	41
2.1 Seleção das Galáxias . . . . .	41
2.2 Observações com o IRTF . . . . .	41
2.3 Observações com o WHT . . . . .	43
2.4 Observação e Tratamento dos Dados . . . . .	45
2.5 Ajustes dos perfis de linha . . . . .	46

3. <i>Resultados e Discussões</i> . . . . .	51
3.1 Linhas de emissão na amostra de galáxias no infravermelho próximo . . . .	51
3.2 Linhas de absorção . . . . .	61
3.3 Fonte Dominante de Excitação das OHMGs . . . . .	61
3.4 Avermelhamento das galáxias da amostra . . . . .	66
4. <i>Conclusões</i> . . . . .	73
<i>Referências</i> . . . . .	77
 <i>Apêndice</i>	85
A. <i>Ajustes dos Perfis de Linhas de Emissão da Amostra</i> . . . . .	87
B. <i>Proceeding da Sociedade Astronômica Brasileira</i> . . . . .	97

## Introdução

Desde o início do pensamento filosófico na Grécia o modo como a humanidade entende a si próprio, a sociedade, o universo e suas leis naturais passa por uma constante evolução. No princípio, objetos astronômicos e fenômenos naturais eram confundidos com deuses e ações dos mesmos. A astronomia, a mais antiga das ciências, permitiu que a humanidade enxergasse além das crenças antigas, objetos astronômicos que antes eram considerados divindades como o Sol sendo o Deus Apolo e a Lua a Deusa Artemis hoje são compreendidos como uma estrela e um satélite, respectivamente. Indo além, podemos compreender que se antes a Terra era considerada o centro do universo com outros corpos a orbitando, sabemos hoje que somos apenas mais um planeta orbitando o Sol, nossa estrela mãe, e este pertence a um conjunto de estrelas maior orbitando um outro centro, a Via Láctea e seu buraco negro. Podemos ir mais adiante ainda para perceber que a Via Láctea não é a única galáxia do universo.

Com a evolução da tecnologia, novos telescópios foram construídos e a medida que acontecem avanços são construídos instrumentos com maior resolução espacial e espectral, assim como instrumentos mais sensíveis em todos os comprimentos de onda.

A tecnologia permitiu que a humanidade observasse o céu em comprimentos de ondas além do visível a olho nu e a cada diferente comprimento de onda explorado a ciência tem novas surpresas, pois a cada janela aberta novos conhecimentos e novos questionamentos surgem. Um destes questionamentos é o que motiva este trabalho, dentre os vários objetos que compõe todo o universo observável há um em especial, o núcleo ativo de galáxias (AGNs, do inglês *Active Galactic Nuclei*), pois dentro do paradigma atual acredita-se que a fonte de ionização desses objetos não é apenas de estrelas (fontes térmicas) e sim oriunda do buraco-negro super massivo (SMBH, do inglês *Super-Massive Black-Hole*) em seu centro

(e.g. Peterson, 1997).

### 1.1 Núcleo ativo de galáxias

Dentro do paradigma atual é sabido que algumas galáxias possuem SMBH em seu centro e quando este acreta matéria através de um disco de acreção, o que de maneira análoga pode-se dizer que está se alimentado de matéria, este tipo de fonte recebe o nome de AGN. Os AGNs são objetos bastante energéticos, porém essa energia não pode ser explicada apenas por fontes estelares (Peterson, 1997). A primeira pessoa a detectar este objeto foi Edward A. Fath no ano de 1908 que estudava uma suposta “nebulosa” com um pequeno espectrógrafo (Osterbrock, 1989), na ocasião o objeto estudado, até o presente momento foi classificado como uma nebulosa, pois possuía linhas de emissão muito brilhantes, estas emissões eram de  $H\beta$ ,  $[N II]$ ,  $[O II]$ . Fath interpretou esse espectro como um resultado da soma de espectros de várias estrelas muito próximas, próximas o bastante para aparentar ser um único objeto. Décadas após este estudo, Hubble detectou as mesmas linhas em dois objetos diferentes.

Entretanto, foi apenas em 1943 que Carl K. Seyfert publicou seu trabalho no qual afirmava claramente que uma fração muito pequena de galáxias possuíam núcleos cujos espectros mostram muitas linhas de emissão com alto grau de ionização (Osterbrock, 1989). Porém, esse assunto ficou adormecido até 1959 quando voltou a voga a questão da fonte ionizante no núcleo de galáxias, na última década. Padovani et al. (2017) lista quatro principais características dos AGNs, são elas:

(i) alta luminosidade, luminosidade bolométrica  $\sim 10^{48}$  ergs $^{-1}$ , o que os tornam as fontes mais energéticas do Universo;

(ii) regiões compactas, da ordem de um miliparsec, como inferido por sua alta variabilidade (Ulrich et al., 2003) em comprimentos de onda implicando em altas densidades de energia;

(iii) forte evolução ao longo da função luminosidade (e.g Merloni e Heinz (2012));

(iv) emissões detectáveis cobrindo todo o espectro eletromagnético.

A emissão em diferentes comprimentos de ondas permite estudar informações sobre fontes ionizantes e propriedades do gás e poeira das galáxias. A banda do infravermelho ou simplesmente IR (do inglês *Infrared*) possui assinaturas do material obscurecido pelo toros de poeira (Antonucci, 1993), enquanto através das bandas do óptico e ultravioleta (UV) podemos estudar as emissões do disco de acreção e a banda de raio-X traça emissão com alto potencial de ionização (por exemplo, a linha do Fe K $\alpha$  possui um potencial de ionização de 6.4KeV, Padovani et al., 2017). Para uma revisão mais completa sobre as propriedades físicas de AGNs consultar trabalhos dos autores Antonucci (1993) e Padovani et al. (2017), assim como referências lá citadas.

Atualmente há uma ampla quantidade de classes de AGNs, sendo as principais classes compostas por galáxias Seyferts e quasares. Essas classificações são baseadas na quantidade de energia que o núcleo emite e ângulo de posição do observador em relação à galáxias (Peterson, 1997).

### 1.1.1 Galáxias Seyfert

Seyfert (1943) foi o primeiro a propor um cenário físico para os objetos conhecidos como *nebulosas extragalácticas* com núcleo extremamente brilhante. Nesta proposta Seyfert sugeriu a existência de duas classes de objetos utilizando os indicadores nos alargamento das linhas de emissão. Seyfert nomeou como Seyfert 1, galáxias que possuem linhas alargadas (FWHM até  $\sim 5000 \text{ km s}^{-1}$ ) e Seyfert 2, galáxias que possuem linhas estreitas (FWHM  $< 1000 \text{ km s}^{-1}$ ) (Pradhan e Nahar, 2015).

Atualmente a classificação das galáxias Seyfert se divide em três classes, são elas:

(i) **Seyfert 1:** Possui espectro com linhas de emissão permitidas (H I, He I e He II) com alargamento (FWHM) em torno de  $\sim 1000 - 5000 \text{ km s}^{-1}$ . Além disso possui linhas de emissão proibidas, exemplo [O III], [S II] e [Si IV], apresentando perfil estreito com FWHM em torno de  $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$  (Osterbrock, 1989).

(ii) **Seyfert 2:** Possui apenas componentes estreitas tanto nas linhas de emissão permitidas quanto nas proibidas, alcançando valores de FWHM  $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$  (Osterbrock,

1989).

(iii) **Seyfert 1.5-1.9:** Este é um tipo intermediário de Seyfert, este tipo pode apresentar linhas permitidas tanto largas ( $< 2000 \text{ km s}^{-1}$ ) quanto estreitas ( $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$ ) além de apresentar linhas com alto potencial de ionização como por exemplo  $[\text{Si x}]$  e  $[\text{Si IV}]$  (Osterbrock, 1989).

### 1.1.2 Modelo Unificado de AGN

Para descrever as diferentes cinemáticas detectadas pelas linhas de emissão permitidas e proibidas das galáxias Seyfert, Antonucci e Miller (1985) propuseram a existência de um modelo unificado de AGNs. Esses autores sugeriram que a radiação emitida pelo AGN é proveniente de uma acreção de matéria através de um disco próximo ao SMBH. Além disso, o modelo unificado de AGNs prevê presença de um toro de poeira circundando o disco de acreção e seu SMBH (ver Figura 1.1).

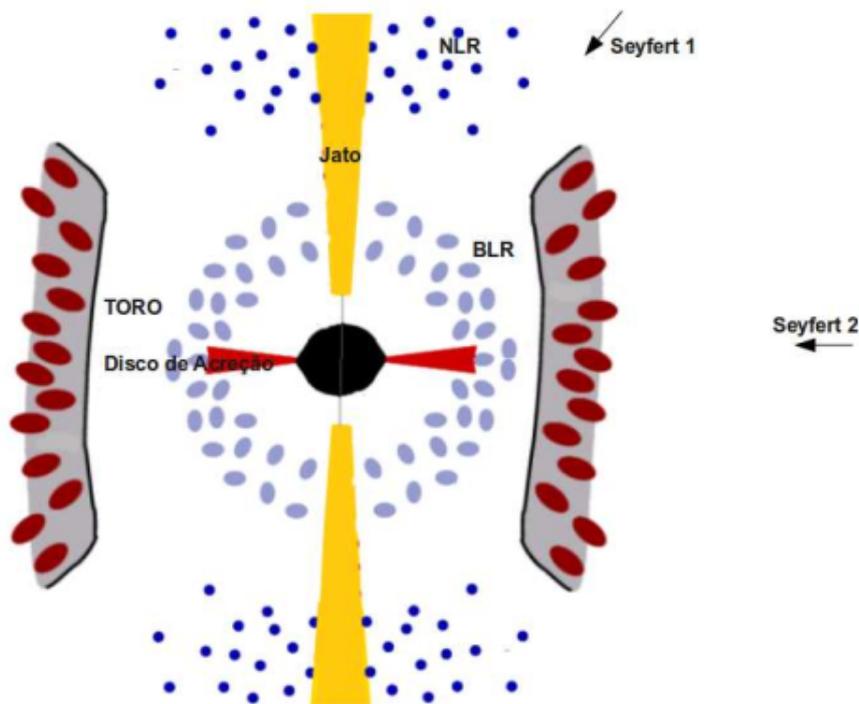


Figura 1.1: Ilustração mostrando um esquema do modelo unificado de AGN. No centro existe um SMBH (circunferência preta) circundado por um disco de acreção (vermelho) e ao longo por um toro molecular. A posição referente a linha de visada as classes de Seyfert 1 e 2 estão mostradas. Os jatos, BLR e NLR também são representadas. **Crédito:** Imagem retirada de Sales (2012)

De acordo com modelo unificado as galáxias Seyfert são um único objeto, entretanto, o que diferencia o tipo 1 do 2 é a linha de visada do observador. Nas galáxias Seyfert 1 a visão do observador não é obscurecida pelo toro de poeira permitindo a visualização da região de linhas largas (BLR, do inglês *Broad Line Region*). Nas galáxias Seyfert 2, o observador olha através do toro, deste modo, as regiões centrais não podem ser vistas resultando em um espectro composto apenas por linhas estreitas, pois, apenas as regiões de linhas estreitas (NLR, do inglês *Narrow Line Region*) podem ser vistas.

Antonucci et al. (1993) sugere que as linhas largas são produzidas por gás de alta densidade eletrônica ( $n_e \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) e alta temperatura (2000K). Este gás se encontra distribuído em forma de disco de acreção próximo ao SMBH. O fato dele estar próximo ao potencial gravitacional do SMBH aumenta a energia cinética do gás e o mesmo pode alcançar velocidades da ordem de  $1-10 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$ . Entretanto, as NLRs são responsáveis pela emissão de linhas proibidas e estreitas ( $< 5 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$ ) que se distribuem espacialmente em simetria axial e estendem-se por uma região de cerca de poucos kiloparsec do SMBH.

### 1.1.3 Quasi stellar objects - QUASARES

Quasi stellar objects ou simplesmente QUASAR são fontes pontuais bastante energéticas. Descobertas primeiramente por Matthews e Sandage (1963) ao estudar a fonte pontual 3C 48 que, apesar de aparentar ser um estrela de brilho atenuado (cerca de 16 magnitudes no óptico), apresentava um grande alargamento em linhas de emissão, o que se tornava incompatível com um objeto estelar.

Neste mesmo ano, Schmidt (1963) estudando a rádio fonte 3C 273 notou que as linhas alargadas correspondiam às linhas de Balmer, porém, deslocadas para o vermelho (*redshift*). O valor deste deslocamento corresponde a um *redshift* de aproximadamente 0.158, o que era um valor incrivelmente alto para a época. Com esse valor de redshift Schmidt (1963) pôde concluir que estas rádios fontes estavam fora da Via-Láctea e sua aparência estelar era devido ao seu alto *redshift*.

Apesar de possuir alto *redshift* as fontes eram extremamente brilhantes o que as tornavam objetos mais energéticos do Universo. Atualmente há Quasares catalogados com  $\text{redshift} \geq 6$  (Gastão, 2018).

Os espectros dos Quasares, semelhantes aos das Seyfert 1, possuem linhas de emissão

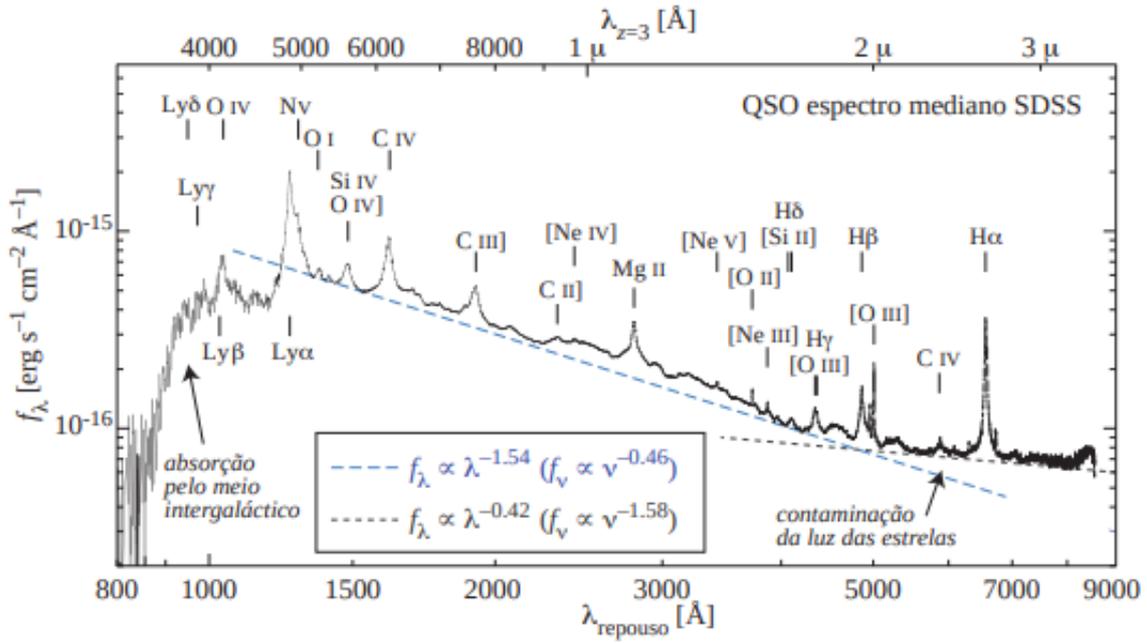


Figura 1.2: Espectro mediano de um QUASAR produzido por  $\sim 200$  espectros observados pelo Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Podemos perceber que em comprimentos de onda  $\leq 912\text{\AA}$  a absorção pelo HI impede a observação do contínuo no UV. **credito:** Imagem retirada de (Gastão, 2018).

permitidas alargadas, porém, as linhas de emissão proibidas são fracas ou inexistente (Davidson e Netzer, 1979). A Figura 1.2 mostra um exemplo de espectro em comprimentos de onda do UV e óptico de um Quasar. Esse espectro foi observado pelo *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) e obtido através de uma mediana de 200 observações. A Figura 1.2 também mostra um ajuste de duas leis de potência que descreve o contínuo dessa fonte e foram representadas pelas linhas tracejadas azul ( $\approx \lambda^{-1.54}$ ) e preta ( $\approx \lambda^{-1.54}$ ). O contínuo de um AGN nesses comprimentos de onda é o resultado da soma de vários corpos negros que compõem o plasma do disco de acreção. Cada comprimento de onda descreve a emissão em diferentes temperaturas do disco.

## 1.2 Galáxias Starburst

Galáxias Starburst apresentam uma alta taxa de formação estelar jovem ( $\approx 10M_{\odot} s^{-1} Kpc^{-2}$ ), cerca de  $10^3$  vezes que as galáxias ditas comuns (compare com a Via Láctea  $1,65 \pm 0.20 M_{\odot}$ ) (Licquia e Newman, 2015) em regiões compactas (1 Kpc) onde o gás é altamente denso e concentrado (Sales, 2012). Este tipo de galáxia foi estudada primeiramente por Morgan (1959), porém, o termo Starburst só foi usado pela primeira vez por

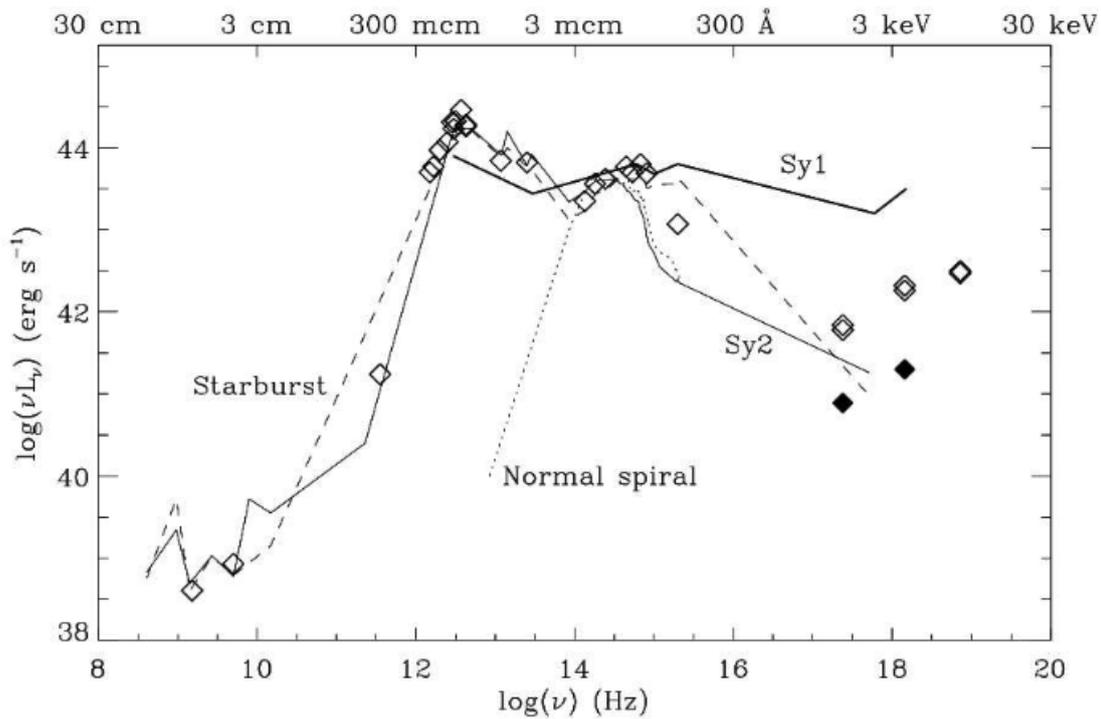


Figura 1.3: Distribuição espectral de energia típicos de galáxias Seyferts e starburst. Linha contínua forte representa galáxia Seyfert 1, linha contínua mais suave representa galáxia Seyfert 2 e a linha tracejada representa galáxia starburst. Linha pontilhada representa uma galáxia espiral normal. **crédito:** Figura retirada de Yankulova et al. (2007).

Weedman (1981).

Em muitos casos o surto de formação estelar deste tipo de galáxia se dá na região central ( $r \leq 1\text{Kpc}$ ). Para estes casos a formação estelar é alimentada pelo o gás que se acumula na região central. A barra presente em algumas galáxias espirais pode ser o mecanismo mais eficaz para alimentar tal formação (Gastão, 2018).

A descoberta dessa nova classe de objetos iniciou um estudo sistemático dos núcleos de galáxias peculiares realizado por Sérsic e Pastoriza (1965). Esses autores demonstraram que galáxias peculiares apresentam dois tipos diferentes de núcleos, os núcleos nomeados como “hot spot” e os núcleos “amorfo”. Alguns anos depois, Pastoriza (1967, 1975) apontou semelhança entre as características dessas galáxias peculiares e regiões H II. As galáxias que apresentavam estas características ficaram conhecidas posteriormente como galáxias Sérsic-Pastoriza (Osmer et al., 1974). Desde essa época podemos ver na literatura estudos sobre uma possível correlação entre as galáxias do tipo AGN e Starburst (Cid Fernandes et al., 2001).

A principal diferença entre as galáxias Starbursts e AGNs é que a primeira apresenta

grande parte da radiação emitindo em comprimento de onda do UV e óptico de origem térmica devido a intensa formação estelar jovem (Searle et al., 1973). Entretanto, os AGNs possuem o contínuo obedecendo uma lei de potência (ver Figura 1.3) e a radiação emitida por estes objetos se originam no disco de acreção que alimenta o SMBH central (Shakura e Sunyaev, 1973).

Figura 1.3 apresenta uma comparação das distribuições espectrais de energia entre galáxias Starburst, Seyferts e normais. Podemos perceber na figura que uma galáxia normal possui a maior parte de sua emissão no UV e óptico, enquanto as galáxias starburst e Seyferts possuem emissão desde o Raio X até o rádio (3keV - 30 cm). Por outro lado, as galáxias Seyfert 1 são os objetos que possuem um excesso de emissão em raio X. Esse fato corrobora com o modelo unificado de AGNs. Tal modelo descreve que nas galáxias Seyfert 1 o observador possui em sua linha de visada a emissão das BLRs e também a visão do disco de acreção dos SMBHs.

### 1.3 Galáxias Ultra-Luminosas no Infravermelho

Galáxias luminosas e ultra-luminosas no infravermelho ([U]RLIG, do inglês [*Ultra*]Luminous Galaxies) são galáxias que possui uma alta luminosidade no infravermelho alcançando valores  $> 10^{11}L_{\odot}$  (Sanders et al., 1988a)

Por possuir a maior parte de sua luminosidade no IR a detecção dessas galáxias só foi possível quando iniciaram as observações com o telescópio *Infrared Astronomical Satellite*<sup>1</sup> (IRAS). O telescópio IRAS permitiu uma nova visão do universo, suas observações detectaram cerca de 350 mil fontes infravermelhas.

Soifer et al. (1987) derivou a função de luminosidade de galáxias no IR e é mostrada na Figura 1.4. Esta figura apresenta o comportamento da densidade de galáxias que emitem nas bandas fotométricas em  $12\mu\text{m}$ ,  $25\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$  e  $100\mu\text{m}$ .

É possível ver que [U]LIRGs (pontos na figura referentes a  $60\mu\text{m}$  e  $100\mu\text{m}$ ) com alta luminosidade bolométrica ( $\log \nu L_{\nu} > 10^{10} L_{\odot}$ ) são mais frequentes, apresentando cerca de uma ordem de grandeza maior em densidade (ver Figura 1.4). Esses resultados nos levam a concluir que as [U]LIRGs dominam o limite superior da função luminosidade de galáxias

<sup>1</sup> Mais informações sobre o IRAS estão disponíveis em: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/infrared-astronomical-satellite-iras/>

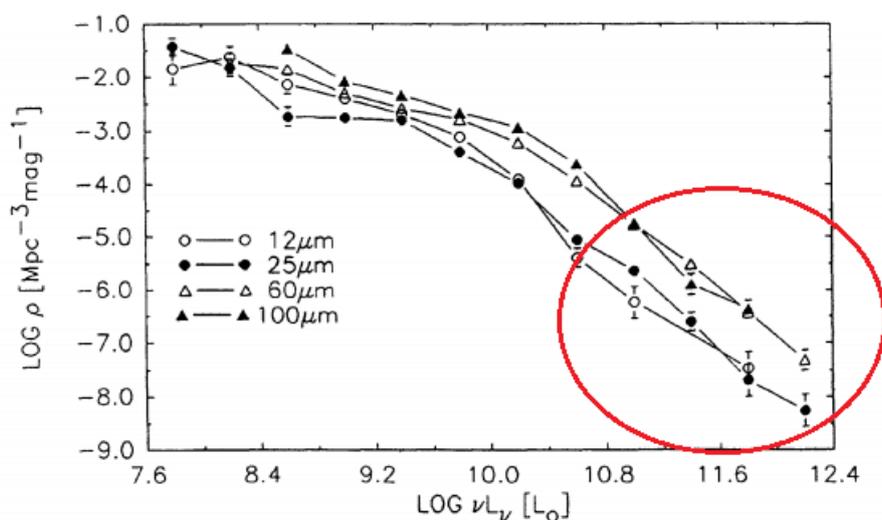


Figura 1.4: Função de luminosidade, plotadas como densidade espacial versus luminosidade para as amostras de 12, 25, 60  $\mu\text{m}$  (BGS) e 100  $\mu\text{m}$ . A luminosidade é  $\nu L_\nu$  ( $\lambda$ ), em unidades de luminosidades bolométricas solares. O círculo vermelho destaca a área onde a maior diferença entre as amostras. **Créditos:** Imagem adaptada de Soifer e Neugebauer (1991)

do universo local (Soifer et al., 1987).

[U]LIRGs são raras no universo local, porém, em alto *redshift* ( $z > 1$ ) sua população é maior. Dado este fato acredita-se que estudar estes objetos é importante para entender características da evolução de galáxias.

O primeiro estudo feito com uma amostra observado pelo IRAS foi realizado por Houck et al. (1985). Neste estudo observou-se uma amostra de 9 galáxias com um alto brilho no comprimento de onda do IR, porém, estes objetos eram praticamente invisíveis no óptico.

Acredita-se que as [U]LIRGs são originadas por colisão de galáxias espirais ricas em gás que, por efeito de maré, acaba gerando um surto de formação estelar. A energia emitida pelas estrelas é absorvida por grãos de poeira e reemitida em radiação IR, gerando assim, um intenso brilho nesta faixa espectral. A interação entre galáxias pode levar à ativação do SMBH no núcleo da galáxia gerando assim um núcleo ativo de galáxia (Sanders et al., 1988b; Dyson e Perry, 1985; Scoville e Norman, 1989)

A ULIRG mais brilhante e próxima da Via Láctea é a Arp220 (Figura 1.5). Ela ocupa a 220° posição no Atlas das galáxias peculiares (Arp, 1966). A Arp220 é o resultado da colisão de duas galáxias espirais. Ela possui dois núcleos com SMBH que foram detectados com o CHANDRA, telescópio de Raios-X, e possui uma região de formação estelar jovem com a área equivalente a 5% da Via Láctea (Wilson et al., 2006).

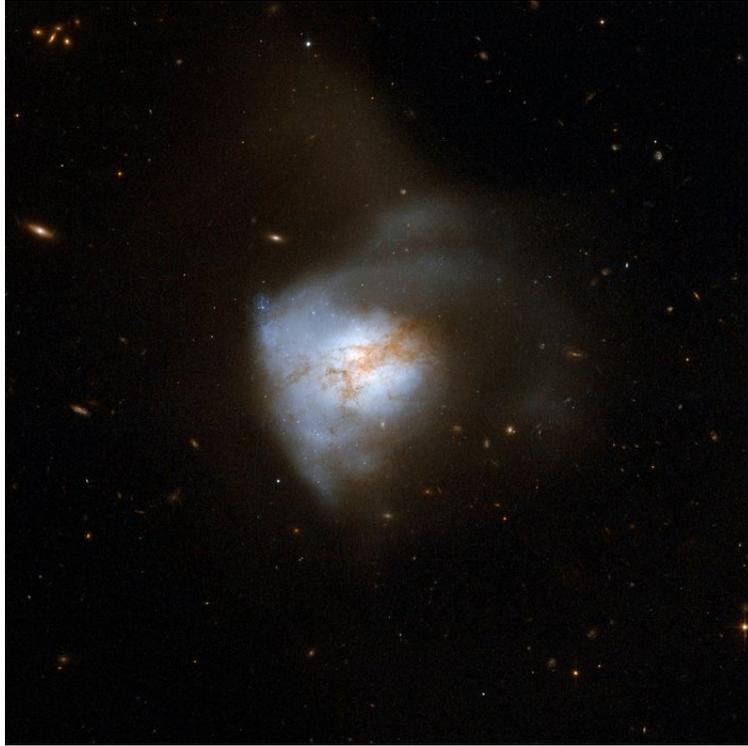


Figura 1.5: Imagem da galáxia Arp220 capturada pelo telescópio espacial Hubble, Créditos:NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University)

## 1.4 Galáxias com Emissão de OH

### 1.4.1 Emissão de MASER

Em 1917 Albert Einstein demonstrou matematicamente um fenômeno que ficou conhecido como emissão estimulada, essa emissão ocorre quando um fóton decai um nível de menor energia que não esteja previamente ocupado e com isso excita um átomo, o último emite um outro fóton com mesma frequência, fase, polarização e direção que o fóton anterior.

A primeira vez que este evento demonstrado teoricamente por Einstein foi observado na natureza foi através de um aparelho criado por Gordon et al. (1955). O aparelho em questão possuía a função de amplificar sinais na faixa das microondas e recebeu o nome de MASER (*do inglês Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Porém, apesar de que na superfície terrestre a emissão estimulada, ou simplesmente MASER, ser observado apenas em laboratórios, através de aparelhos, no meio interestelar (ISM do inglês *Interstellar Medium*) e galáctico MASERs ocorrem naturalmente.

Os MASERs galácticos foram uma importante descoberta para a astronomia molecu-

lar, pois os mesmos carregam importantes características do fóton excitante. Estas características está ligada a oscilações de átomos ou moléculas causadas pelo campo magnético associado ao fóton.

Para que ocorra a emissão estimulada é necessários condições específicas de equilíbrio térmico e densidade, por este motivo, MASERs ocorrem de maneira natural apenas no espaço. O gás nesse ambiente encontra-se próximo à fontes excitantes e apresenta uma densidade igual a  $(N(\text{H}_2) > 10^7 \text{cm}^{-3})$ . Na via Láctea os MASERs mais comuns são o de OH (hidroxila)  $\nu = 1.6 \text{ GHz}$  e o de  $\text{H}_2\text{O}$   $\nu = 2.2 \text{ GHz}$  (Weaver et al., 1965; Xiang e Turner, 1995).

O MASER de OH foi detectado pela a primeira vez por Weinreb et al. (1963), esta também foi a primeira vez que uma molécula foi detectada por um rádio telescópio. Alguns anos após a detecção do MASER por Weinreb et al. (1963) outros três MASERs foram encontrados,  $\text{NH}_3$  (Cheung et al., 1968),  $\text{H}_2\text{CO}$  (Zuckerman et al., 1970) e  $\text{H}_2$  (Cheung et al., 1969).

Apesar de ter um ambiente que permite a aparição de MASERs naturais, eles não são tão frequentes, mesmo em ambientes fora da Via Láctea. O primeiro MASER detectado de uma fonte fora da Via Láctea foi um MASER de  $\text{H}_2\text{O}$  oriundo de uma região H II da galáxia M33 detectado por Churchwell et al. (1977). Um ano após essa descoberta Huchtmeier et al. (1978) detectou outros MASERs de  $\text{H}_2\text{O}$  oriundos de outras regiões de M33. Em 1979, foi detectado por Dos Santos e Lepine (1979) na galáxia NGC 4945 um MASER de  $\text{H}_2\text{O}$  10 vezes mais brilhante que os MASERs galácticos detectados até então, na ocasião, foi utilizado o rádio telescópio do Itapetinga. Este é um rádio telescópio brasileiro de 13.7 m .

Alguns anos após a detecção feita por Dos Santos e Lepine (1979) outros MASERs deste tipo foram detectados utilizando rádio telescópios como o Parkes de 64 m e Owens Valley Radio Observatory, de 40 m. (Gardner e Whiteoak, 1982; Claussen et al., 1984; Claussen e Lo, 1986). Para estes MASERs extremamente brilhantes foi dado o nome de megaMASER (Dos Santos e Lepine, 1979; Baan et al., 1982).

O megaMASERs são encontrados nas regiões ricas em gás molecular com altas densidades. À poucos parsecs de um AGN para o caso do megaMASER de  $\text{H}_2\text{O}$  e dentro de regiões nucleares em galáxias Starburst para o caso do megaMASER de OH (Lo, 2005).

### 1.4.2 MegaMaser de OH

Apesar da existência de vários tipos de MASERs, este trabalho limita-se a um estudo de galáxias que possuem megaMASER de OH. Pois, a presença deste megaMASER pode estar ligado a um período de transição no cenário evolutivo de galáxias.

Os primeiros megaMASER de OH encontrados de fontes extragalácticas foram emitidos pela galáxia NGC253 e eram 10 vezes mais brilhante que os MASERs de OH comuns.

Lo (2005) lista três condições para a emissão do megaMASER de OH:

(i) A emissão é devido à amplificação do sinal emitido em rádio de uma fonte atrás da poeira;

(ii) As temperaturas de excitação para as linhas principais são iguais;

(iii) A proporção da profundidade óptica é consistente com o valor Equilíbrio Térmico.

Darling e Giovanelli (2002, 2001, 2000) investigaram a relação entre a luminosidade no IR e a emissão do megaMASER de OH com uma amostra de 311 LIRGs observadas por um período de 200h com o telescópio Arecibo de 305 m com uma largura de banda cobrindo  $\sim 4500 \text{ km s}^{-1}$ . Neste estudo os autores notaram 52 fontes de megaMASER de OH, 1 fonte absorvidora de OH e 25 casos ambíguos devido à interferência do H I galáctico ou provocado pelo o homem, além disso, notou-se que a tendência de LIRGs com cores mais quentes possuem megaMASER de OH (Figura 1.6).

Pode-se notar na Figura 1.6 que os pontos azuis estão localizado a esquerda do eixo  $100 \mu\text{m} / 60 \mu\text{m}$ , isso significa que o fluxo de  $60 \mu\text{m}$  é oriunda de um corpo negro de maior temperatura.

Darling e Giovanelli (2002) notaram que LIRGs com emissão de megaMASER de OH possuem uma alta razão de luminosidade IR/rádio se comparadas com LIRGs que não emitem megaMASER de OH. Segundo Darling e Giovanelli (2002) isso é devido ao fato de que LIRGs com detecção de OH estejam passando por uma formação estelar muito recente, na qual a emissão global do continuum de rádio ainda não alcançou seu pico máximo.

A emissão do megaMASER de OH pode ser utilizada para traçar regiões de alta densidade ( $n(\text{H}_2) = 10^{5-7} \text{ cm}^{-3}$ ). Baan et al. (1985a) sugerem que a separação nas componentes

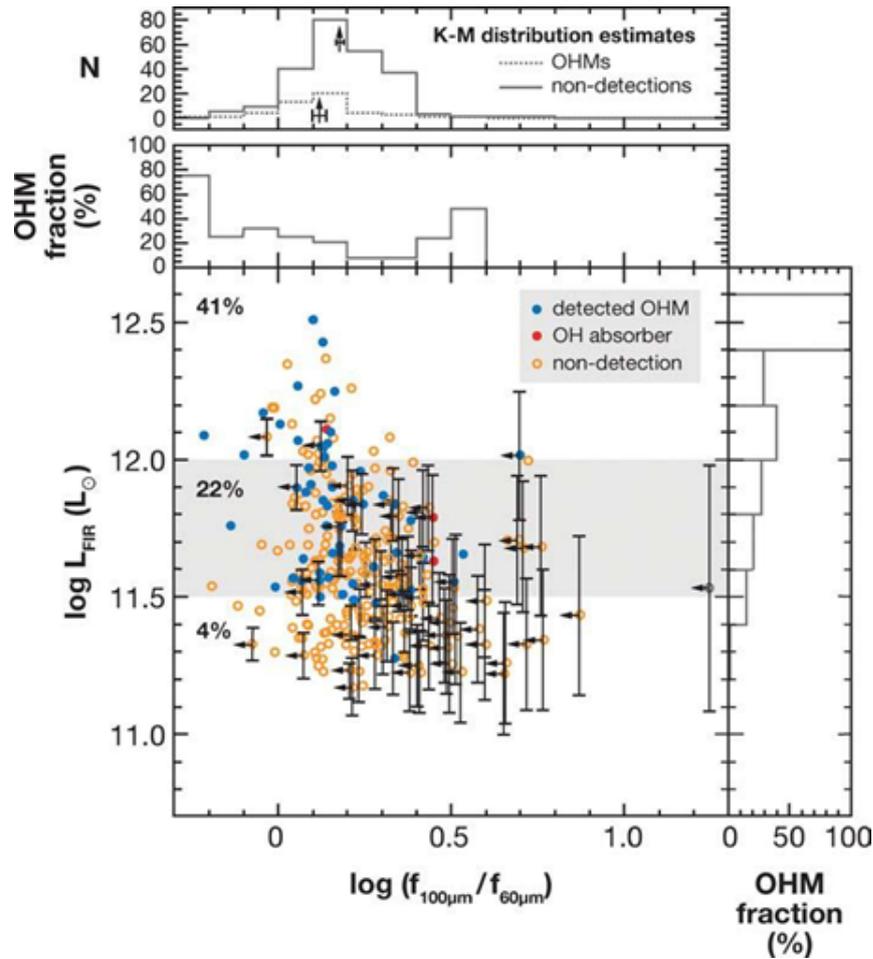


Figura 1.6: O diagrama central grande é um gráfico da cor no Infravermelho distante (eixo horizontal) versus a luminosidade no Infravermelho distante (eixo vertical) da amostra com emissão de megaMASER de OH. Os dois principais diagramas mostram que os LIRGs com emissão de megaMASER de OH tendem a ter cores FIR mais quentes. O diagrama à direita sugere que a emissão de megaMASER de OH é mais comum entre LIRGs mais luminosos. **credito:**(Darling e Giovanelli, 2002)

da emissão de megaMASER pode estar ligada com outflows de matéria pouco denso, porém, com alta velocidade.

Um exemplo de galáxia com emissão de megaMASER de OH é a ARP220( Figura 1.5) esta galáxia possui um megaMASER com cerca de  $400 L_{\odot}$  (Baan et al., 1982).

Observações de alta resolução ( $R \sim 1$ )  $\geq 200$  pc, utilizando o VLA (Very Large Array) investigou fontes de megaMASER de OH, com essa resolução notou-se que o megaMASER de OH coincide com o continuum de rádio (apenas algumas centenas de parsec de distância) corroborando com o modelo de nuvens de poeira e gás ligado a emissão de megaMASER de OH Baan et al. (1985b).

Um exemplo de fonte de megaMASER próxima à Via Láctea foi estudada por Baan e Haschick (1990) e ocupa a posição 299 no catálogo Arp, assim nomeada como Arp299

(Figura 1.7). A Arp299 é um sistema formado por duas galáxias em interação, IC 694 e NGC 3690, é classificada como uma starburst e possui 50% de sua luminosidade vinda de formação estelar jovem (Gallais et al., 2004). O megaMASER de OH foi encontrado no núcleo da IC694 (Baan e Haschick, 1990)



Figura 1.7: Sistema com par de galáxias Arp299. Este sistema é formado por duas galáxias em interação a IC 694 e a NGC 3690 **Credito:**NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University)

## 1.5 ULIRGs e evolução das Galáxias

### 1.5.1 ULIRGs, estágio evolutivo de QUASARES

ULIRGs são alvo da atenção de vários astrônomos e astrofísicos, pois estes objetos podem representar um estágio no cenário evolutivo de galáxias.

Sendo em sua maioria galáxias em interação, as ULIRGs são geradas por colisão de grandes sistemas espirais. Sanders et al. (1988a) foram os primeiros a sugerirem um cenário evolutivo de galáxias em que as ULIRGs descrevem uma fase na evolução. Neste cenário os autores propõem que após colisão de sistemas ricos em gás e poeira ocorre uma fusão e a luminosidade no IR aumenta proporcionalmente a medida que a fusão avança.

Na fase ULIRG o AGN domina a fase de formação estelar, quando a pressão de radiação e supernovas começam a varrer a poeira da região nuclear.

Após atingir o pico máximo a luminosidade no infravermelho volta a diminuir enquanto o SMBH central vai acretando matéria, quando a pressão de radiação e supernovas começam a varrer a poeira da região nuclear o sistema pode convergir em um QUASAR (Sanders et al., 1988a). Uma hipotética ilustração desse possível cenário evolutivo pode ser visto na Figura 1.8.

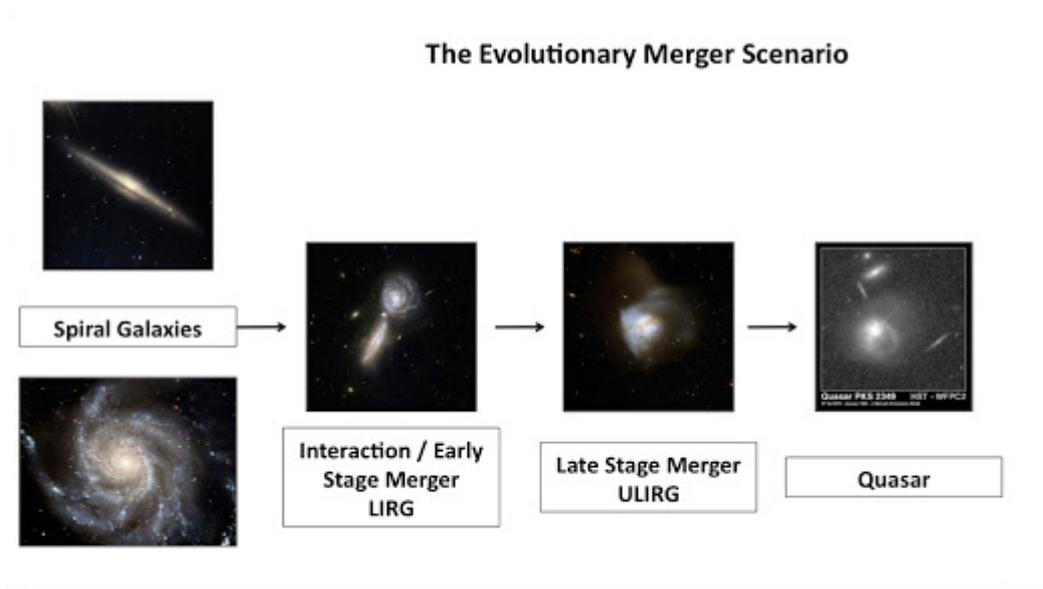


Figura 1.8: Cenário evolutivo das ULIRGs descrito por Sanders et al. (1988a). Figura adaptada de: <http://candels-collaboration.blogspot.com/2012/07/luminous-infrared-galaxies.html&prev=search>

Sanders et al. (1988a) afirmam que uma das maiores evidências de que as ULIRGs desempenham um papel importante no cenário evolutivo de QUASARs vem da comparação de suas densidades espaciais locais. Ainda segundo Sanders et al. (1988a), através de uma análise do continuum no comprimento de onda do óptico, QUASARs com baixo *redshift* ( $z < 4$ ) apresentam distorções ou possuem companheiros próximos, também é possível encontrar galáxias que hospedam um QUASAR como a IRAS00275-2859 (ver Vader et al. (1987)).

## 1.6 Poeira Interestelar

O ISM não é apenas um grande vazio como se achava no início da astronomia. Com o passar dos anos e com o surgimento de melhores equipamentos os astrônomos perceberam

o quão importante é entender a composição e dinâmica do ISM.

Herschel (1786) foi o primeiro a relatar manchas escuras no céu que mais tarde viriam a ser compreendidas como sendo grãos de poeira. Além disso, diversos estudos posteriores como os de Kapteyn (1909) e Struve (1847) apontaram evidências desta poeira como sendo responsável pela extinção interestelar.

A evolução dos equipamentos observacionais permitiu maiores estudos desta poeira interestelar. Trumpler (1930) definiu a extinção na Via Láctea com um valor  $0.67 \text{ mag/kpc}$ . Um exemplo de poeira numa galáxia que hospeda um AGN pode ser visto na Figura 1.9

O estudo da poeira interestelar não é importante apenas por permitir compreender objetos obscurecidos, é também um fator importante para entender a evolução de galáxias, como por exemplo, servindo de catalisador para a produção da molécula de  $H_2$ , onde átomos de Hidrogênio se acumulam na superfície do grão formando assim uma ligação com outro átomo de Hidrogênio (Maciel, 2002).

## 1.7 Extinção e Avermelhamento

Um dos principais efeitos físicos da presença de poeira no ISM é o enfraquecimento da intensidade de radiação que chega ao observador. Este fenômeno é denominado extinção e ocorre quando a luz proveniente de uma estrela ou nebulosa é absorvida ou espalhada (Osterbrock, 1989).

Trumpler (1930) mostra que a luz de estrelas distantes são atenuadas por uma lei do inverso do quadrado da distância. Além disso, a extinção é inversamente proporcional ao comprimento de onda, em outras palavras, quanto menor o comprimento de onda maior será a extinção (KUTNER, 2003).

Um tipo de extinção específica é denominada extinção seletiva ou avermelhamento. A luz azul é mais afetada pela extinção que a luz vermelha, portanto, a luz que chega ao observador tende a ser mais avermelhada (Draine, 2010).

Teoricamente o avermelhamento pode ser calculado pela razão adimensional

$$R_V = \frac{A_V}{A_B - A_V} \quad (1.1)$$

$$R_V = \frac{A_V}{E(B - V)}$$

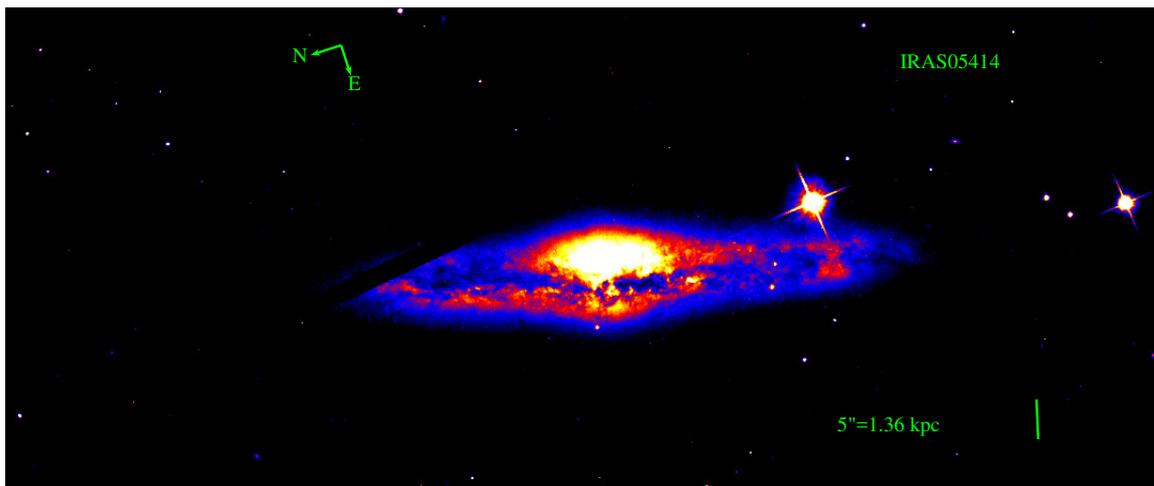


Figura 1.9: Imagem da galáxia IRAS05414. Imagem obtida com ACS F814W (banda i) de nossa subamostra OHMG observada no Ciclo 17 do Telescópio Espacial Hubble.

onde  $A_B$  e  $A_V$  são as extinções medidas na banda B e V e  $E(B - V) = A_B - A_V$  é o avermelhamento (Draine, 2010).

Ao determinar o avermelhamento podemos compreender qual é a real intensidade emitida pela fonte.

## 1.8 Análise Espectral

A espectroscopia é uma das técnicas utilizadas para compreender propriedades físicas e químicas de objetos astronômicos. Ao analisar um espectro eletromagnético deriva-se informações como continuum, fluxo largura equivalente e FWHM.

(i) **continuum:** É o Resultado do espalhamento das linhas discretas a efeito do alargamento espectral, por colisão ou por mudanças no movimento das partículas ao longo da linha de visada, não sendo possível distingui-las. O contínuo de objetos celestes que estejam em equilíbrio térmico se assemelha a um espectro de um corpo negro.

(ii) **Fluxo:** É a medida da área que demonstra a intensidade relação ao continuum, para casos de linhas de emissão temos  $F(\lambda) > F_{continuum}$  e  $F(\lambda) < F_{continuum}$  para o caso de linhas de absorção. O fluxo de uma linha de dado pela expressão

$$F_{Linha} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [F(\lambda) - F_{continuum}] d\lambda \quad (1.2)$$

onde  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  é o intervalo da linha de emissão,  $F_{continuum}$  é o fluxo do continuum que

contém a linha espectral. Vale a pena ressaltar que o continuum deve ser calculado na vizinhança do linha espectral, ou seja,  $\lambda < \lambda_1$  e  $\lambda > \lambda_2$ .

(iii) **Largura Equivalente:** É a largura de uma área retangular com o mesmo fluxo da linha espectral estudada (Figura 1.10). A largura equivalente é dada pela a equação 1.3 e gera uma inversão nos valores da linha estudada, ou seja, temos  $w < 0$  para linhas de emissão e  $w > 0$  para linhas de absorção. Fisicamente a largura equivalente nos mostra a contribuição do gás em comparação à fonte emissora.

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{[F(\lambda) - F_{\text{continuo}}]}{F_{\text{continuo}}} d\lambda \quad (1.3)$$

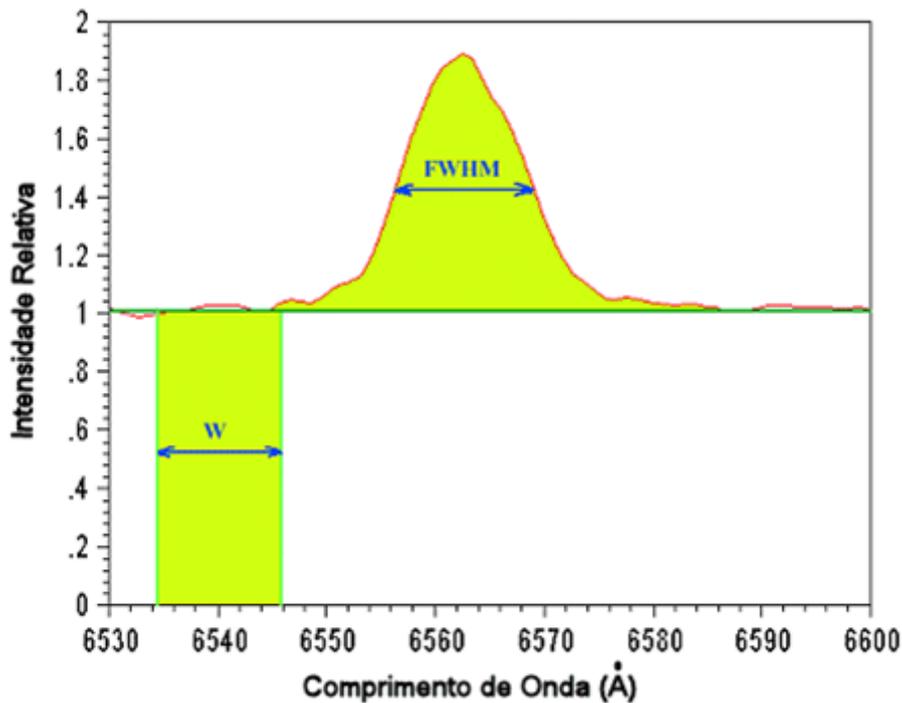


Figura 1.10: Representação da Largura equivalente (parte inferior), FWHM (parte superior) e continuo (linha verde em  $y=1$ ). Figura disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/telesco/espectroscopia.html>

(iv) **FWHM:** do inglês *Full Width at Half Maximum* que significa largura a meia altura. É um parâmetro usado para descrever a largura de uma função e é dado por um intervalo  $x = \lambda_2 - \lambda_1$  donde os pontos  $\lambda_2$  e  $\lambda_1$  são valores de  $x$  onde  $y$  possui metade do seu valor máximo (ver parte superior da Figura 1.10). Para uma distribuição gaussiana o FWHM é dado pela expressão:

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln(2)}\sigma \approx 2,355\sigma \quad (1.4)$$

onde  $\sigma$  é um intervalo representado por  $\lambda_1 - \lambda_2$ . Em astrofísica esta grandeza é dada em  $\text{Km s}^{-1}$ , e representa a velocidade do gás emissor. Para valores de FWHM muito altos em AGN, acima de  $1000 \text{ Km s}^{-1}$  temos uma clara assinatura das BLRs hipotetizado pelo modelo unificado de AGNs.

## 1.9 Motivação e Objetivos

Estudar AGNs na faixa do infravermelho próximo ou simplesmente NIR (sigla do inglês *Nier Infrared*) é uma ótima oportunidade pois esta região espectral possui várias características interessantes, tanto do continuum quanto das linhas de emissão. A presença destas características possibilita o estudo de várias propriedades físicas do gás ionizado, da poeira quente ( $\sim 1500 \text{ K}$ ) e do Hidrogênio molecular (Rodríguez-Ardila et al., 2011; Riffel et al., 2006; Rodríguez-Ardila e Mazzalay, 2006).

Além do fato de que o NIR é o menos afetado pelo efeito de extinção do que a faixa espectral do visível. Logo, o NIR mostra-se ótimo derivar informações da fonte ionizante das OHMGs.

Deste modo, estudar ULIRGs na faixa do NIR torna-se bastante vantajoso, pois estes objetos possuem como característica a abundante poeira.

Assim, para uma melhor compreensão do papel das ULIRGs com emissão de megaMASER de OH no cenário evolutivo de AGN, bem como entender a relação de galáxias Starburst e AGN é necessário maiores investigações nesta faixa espectral específica.

Este trabalho tem a pretensão de derivar pela primeira vez as propriedades físicas de uma amostra de OHMGs na faixa espectral do NIR. Esta investigação objetiva mapear as linhas emitidas por esta amostra específica, além de classificar as galáxias da amostra de acordo com sua atividade nuclear.

Compreender o tipo de atividade dominante nessa amostra é o passo inicial para compreender qual a ligação entre a emissão do megaMASER de OH e o núcleo ativo de galáxias.

Este trabalho recebeu prêmio de destaque na XLII Reunião anual da SAB e XX Encontro da Pós-Graduação da UFPEL.



## Observação e Tratamento dos Dados

### 2.1 Seleção das Galáxias

Este trabalho é a fase inicial de uma investigação na faixa espectral do NIR que objetiva estudar 40 OHMGs oriundas do levantamento feito por Darling e Giovanelli (2002) no Observatório de Arecibo.

Nesta fase inicial estudamos 9 OHMGs utilizando dados espectrais oriundos do William Herschel Telescope (WHT) e do espectrógrafo SpeX do IRTF (do inglês *Infrared Telescope Facility*). Desta amostra de 9 OHMGs, 5 já haviam sido observadas no óptico com o Telescópio Hubble na banda  $i$  e  $H\alpha+[N II]$  (Figura 2.2) e compõem a amostra de 16 OHMGs do programa snapshot (PI:Andy) (Figura 2.7). Essas observações com o Telescópio Hubble tiveram o objetivo de obter um continuum e linhas de emissão de uma grande amostra de OHMGs.

A decisão de trabalhar com subconjuntos das ULIRGs deve-se ao fato da possibilidade de haver um AGN atrás do toros de poeira semelhante ao hipotetizado pelo modelo unificado de AGN (Antonucci, Kinney e Hurt, 1993).

### 2.2 Observações com o IRTF

O SpeX<sup>1</sup> (Figura 2.3) é um espectrógrafo de média resolução ( $R = \Delta\lambda/\lambda \sim 2000$ ) do IRTF, Figura 2.4, fica localizado em Mauna Kea, viu sua primeira luz em maio de 2000 e foi atualizado em 2014.

Nesta atualização a matriz Raytheon Aladdin 3 de 1024x1024 foi substituída por uma matriz Teledyne 2048x2048 HAWAII - 2RG e no visor de fenda IR a matriz Aladdin 2

---

<sup>1</sup> ver mais informações sobre o SpeX em: <http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~spex/>

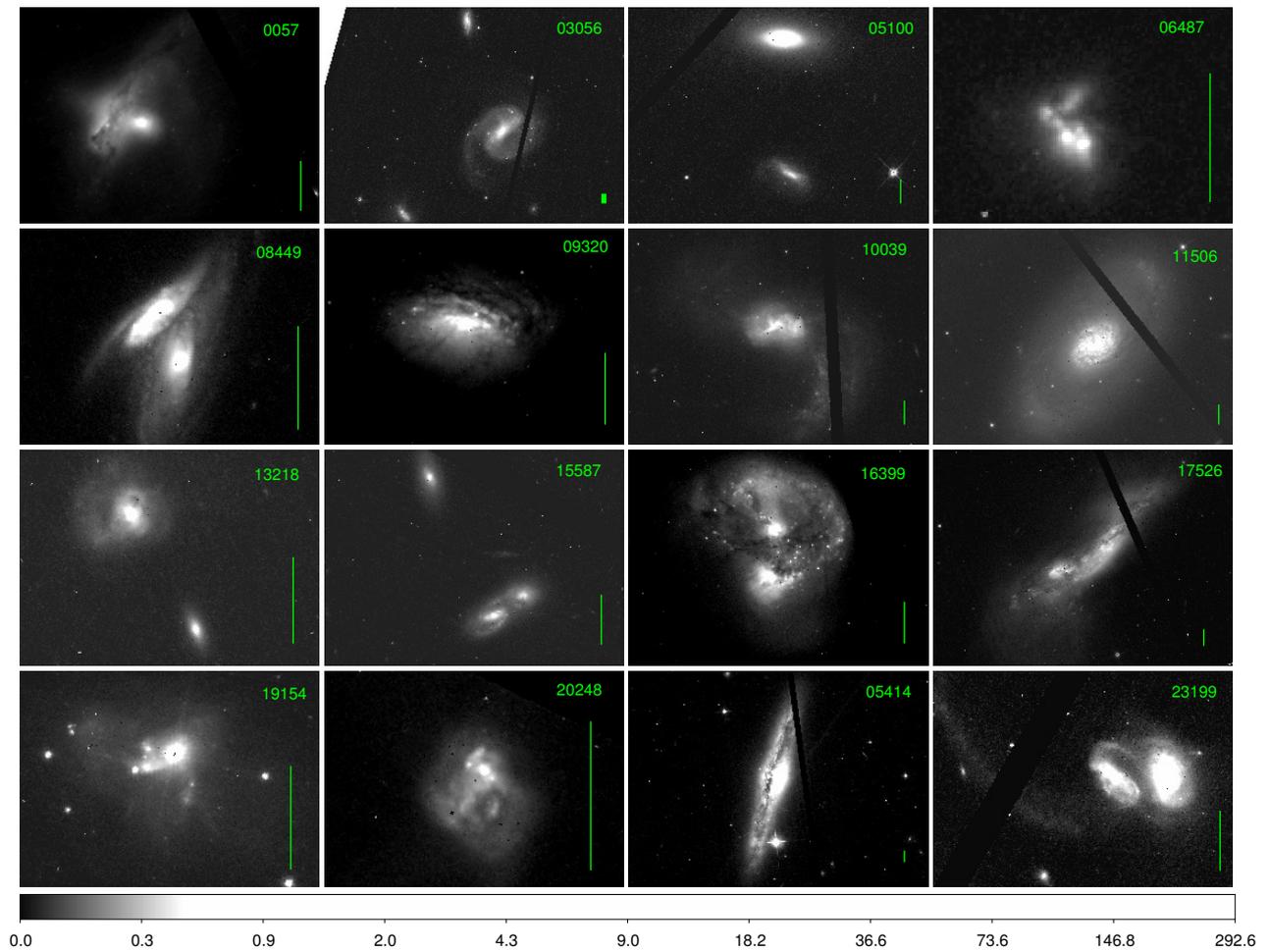


Figura 2.1: Imagens obtidas com ACS F814W (banda i) de nossa subamostra OHMG observada no Ciclo 17 do Telescópio Espacial Hubble. O vetor no canto inferior direito representa 5 segundos de arco.

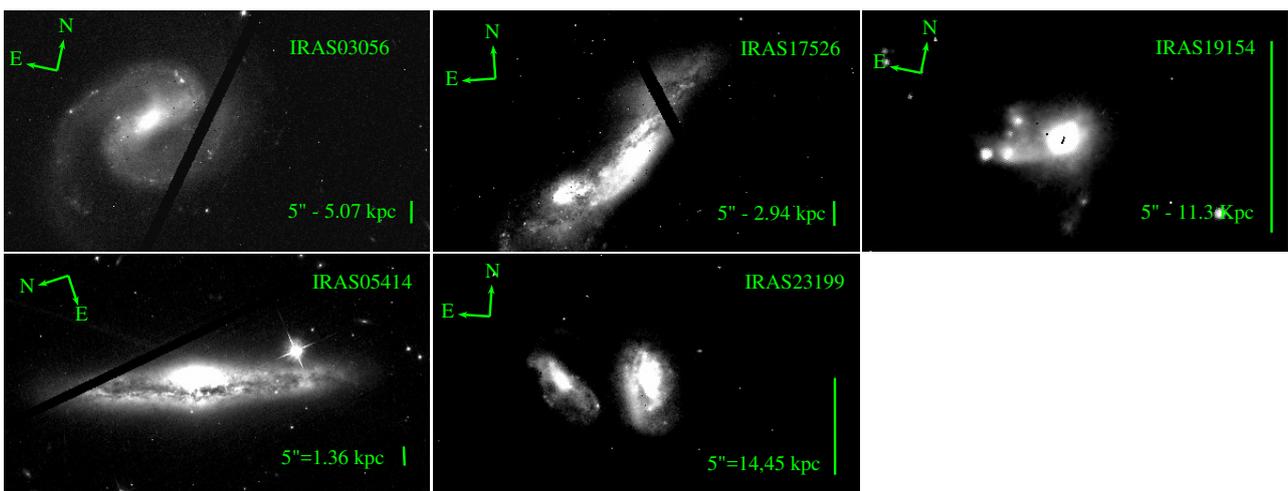


Figura 2.2: Galáxias que foram observadas usando dados de espectroscopia no NIR. Imagens obtidas com ACS F814W (banda i) de nossa subamostra OHMG observada no Ciclo 17 do Telescópio Espacial Hubble. O vetor no canto inferior direito representa 5 segundos de arco.

foi substituída por uma Aladdin 3 isso levou a aumento na cobertura do comprimento simultâneo em todos os modos espectrais (bandas J, H e K), além de obter um ganho no qual melhorou a sensibilidade espectral do aparelho.

As observações utilizando o SpeX ocorreram no modo de Dispersão Cruzada (*cross-dispersed mode*) curta com uma fenda de 0.8" x 0.15". Orientou-se a fenda ao longa do eixo principal para os objetos em que a galáxia hospedeira é claramente detectada nas imagens DSS. Através dessa técnica obteve-se um espectro que cobre o intervalo espectral entre 0.8 e 2.4  $\mu\text{m}$  com uma resolução espectral de  $R \sim 2000$  ( $\delta v \sim 300\text{km/s}$ ).

Com a resolução atual foi possível obter uma escala espacial de 0.15 arcsec / píxel. Durante as observações, as estrelas A0 V foram observadas perto de cada alvo para fornecer padrões telúricos em massas de ar semelhantes.

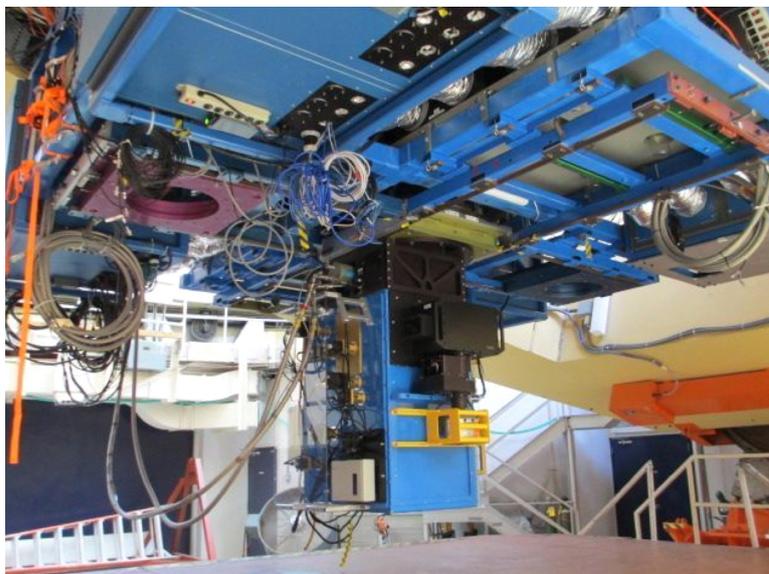


Figura 2.3: espectrografo SpeX instalado no IRTF. **Crédito:** imagem obtida em <http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~speX/>. Acesso em 10/01/20019 às 13:00

## 2.3 Observações com o WHT

O WHT é um telescópio de 4,2 m localizado no Observatório del Roque de los Muchachos nas Ilhas Canárias ( Figura 2.5) e é um dos telescópios do grupo Isaac Newton.

As observações foram obtidas na faixa espectral do NIR usando o espectrógrafo LIRIS<sup>2</sup> (Long-slit Intermediate Resolution Infrared Spectrograph, Figura 2.6), possuindo resolução

<sup>2</sup> ver mais informações sobre o LIRIS: em: <http://www.iac.es/proyecto/LIRIS/>



Figura 2.4: .crédito: imagem obtida em [https://www.nasa.gov/images/content/421648main\\_exoplanet20100203-full-a.jpg](https://www.nasa.gov/images/content/421648main_exoplanet20100203-full-a.jpg). Acesso em 10/01/20019 as 13:00



Figura 2.5: Imagem do William Herschel Telescope localizada na ilha de La Palma, Espanha **Crédito:** imagem obtida em <http://www.ing.iac.es/Astronomy/telescopes/wht/>. Acesso em 10/01/20019 as 13:35

$R = 1000$  com cobertura na mesma faixa espectral do SpeX ( $0.8$  a  $2.5 \mu\text{m}$ ) usando um detector HAKII de  $1\text{k} \times 1\text{k}$ .

A escala de pixels do LIRIS é  $0.25 \text{ arcsec} / \text{pixel}$  e produz um campo de visão de  $4.27 \text{ arcsec} \times 4.27 \text{ arcsec}$ . Seu detector é um array Hawaii  $1024 \times 1024$  e o tamanho do pixel é de  $18,5 \text{ mm}$  gerando uma escala de  $0,25 \text{ arcsec}$ . Para as observações o instrumento utiliza dois grismas ZJ e HK, com cobertura espectral ( $0.887 - 1.531 \mu\text{m}$ ) e ( $1.388 - 2.419 \mu\text{m}$ ), respectivamente.

As observações com o LIRIS foram feitas através de duas configurações, uma utilizando



Figura 2.6: Liris, espectrográfo instalado no William Herschel Telescope, **Crédito:** imagem obtida em <http://www.ing.iac.es/PR/archive/wht/instruments4.html>. Acesso em 10/01/20019 as 13:35

as bandas Z e J ( $0.887 - 1.531 \mu\text{m}$ ) e outra usando as bandas H e K ( $1.388 - 2.419 \mu\text{m}$ ), objetivando construir um espectro 1D entre no intervalo de  $0.8$  a  $2.4 \mu\text{m}$  para cada OHMG da amostra. A resolução espacial foi de  $0.75 \text{ arcsec}$  para o primeiro dia e de  $1 \text{ arcsec}$  para o segundo, com isso conseguimos uma resolução espectral de  $R \sim 1000$  ( $\delta v = 250 \text{ km s}^{-1}$ ) e uma escala espacial de  $0.25 \text{ arcsec / pixel}$

## 2.4 Observação e Tratamento dos Dados

Os dados foram obtidos no segundo semestre de 2014 (WHT / LIRIS: PI - Colina L.) e 2016-B (IRTF / SpeX 2016B125: PI - Sales D.) e Tratados pelo colaborador Alberto Rodriguez-Ardila.

As observações foram realizadas assentindo em um padrão de fonte AB-BA e estrelas A0V foram observadas próximas às galáxias onde esse processo foi adotado para obter padrões telúricos em massas de ar similares. A tabela 2.1 mostra informações sobre a amostra e as condições de observação.

O tempo de observação das galáxias desta amostra foi em média 1 hora para galáxias observadas com o WHT e de 0.5 horas para galáxias observadas com o IRTF. Uma lâmpada de argônico foi usada para a calibração dos dados, o rms (do inglês *root mean square*) foi, em média,  $0.8 \text{ \AA}$ .

Para o tratamento dos dados utilizou-se SPEXTOOL<sup>3</sup> que é um código fornecido pela equipe do IRTF Cushing et al. (2004) para o SpeX. Cada espectro 1D foi calibrado na banda K de uma das estrelas padrão. A calibração em fluxo da amostra foi feita através de um pacote IDL do SpeX e uma rotina no software IRAF.

A Figura 2.7 apresenta os espectros das OHMGs da amostra normalizados em 12000 Å. Os espectros foram agrupados de modo a ficarem mais inclinados no topo e os mais retilíneos na base do gráfico. O ruído proveniente da absorção atmosférica foi removido e algumas das linhas de emissão foram identificadas no topo da imagem, bem como os referidos nomes das OHMGs.

## 2.5 Ajustes dos perfis de linha

Para derivar as informações dos espectros da amostra de OHMGs foi feita pelos autores uma rotina em Python no qual teve como valores iniciais resultados da rotina do NOAO.ONEDSPEC.SPLOT do IRAF. O resultado quantitativo destes ajustes pode ser visto nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 e o resultado qualitativo dos mesmos ajustes se encontram no Apêndice A e nas Figuras 2.8 e 2.9.

A Figura 2.8 exibe um ajuste de duas gaussianas para a linhas de Pa $\alpha$ . A componente estreita está centrada  $\lambda 1,8780 \mu\text{m}$ , enquanto a componente larga esta deslocada para o vermelho e esta centrada em  $\lambda 1,8750 \mu\text{m}$ . Essa componente larga tem o FWHM de 2595 km s<sup>-1</sup>.

É mostrado na Figura 2.9 ajuste de 3 gaussianas para o perfil da linha Pa $\alpha$ . A componente estreita está centrada  $\lambda 1,8750 \mu\text{m}$ , enquanto uma das componentes largas está deslocada para o azul centrada em  $\lambda 1,7000 \mu\text{m}$  e a outra componente larga está deslocada para o vermelho em  $\lambda 1,8850 \mu\text{m}$ . Essas componentes apresentam FWHM de 4169 km s<sup>-1</sup> para componente azulada e 4089 km s<sup>-1</sup> para a componente avermelhada

<sup>3</sup> spextool está disponível no site da IRTF: <http://irtf.ifa.hawaii.edu/Facility/spex/spex.htm>

Tabela 2.1 - Registro de observação e propriedades galáticas básicas para a amostra.

ID	Nome	z	R.A.	DEC	Tipo	Massa de Ar	Data de		PA (°)
							Observação	Integração	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	Mrk926	0.04686	23h04m43.478	-08d41m08.62s	-	1.137	09-14-2016	0.500	85.00
2	IRAS 05414+5840	0.01486	05h45m47.88s	+58d42m03.9s	S2	41.00	09-14-2016	0.150	41.00
3	IRAS 01364-1042	0.04825	01h38m52.921	-10d27m11.42s	-	1.199	09-14-2016	0.399	150.00
4	IRAS 03056+2034	0.02744	03h08m30.710s	+20d46m20.04s	SB	1.07	09/07/2014	0.39	17
5	IRAS 04332+0209	0.01197	04h35m48.369s	+02d15m28.97s	SB	1.399	09-14-2016	0.449	120.00
6	IRAS 17526+3253	0.02601	17h54m29.41s	+32d53m14.2s	-	1.370	09-14-2016	0.399	283.00
7	IRAS 19154+2704	0.09938	19h17m31.41s	+27d10m06.0s	-	1.000387	09-06-2014	1,5	0.00
8	IRAS 23135+2516	0.02742	23h16m00.70s	+25d33m24.1s	S2	1.031443	09-07-2014	1	25.00
9	IRASF 23199+0123	0.13569	23h22m31.63s	+01d39m28.1s	-	1	09-07-2014	1.7	95

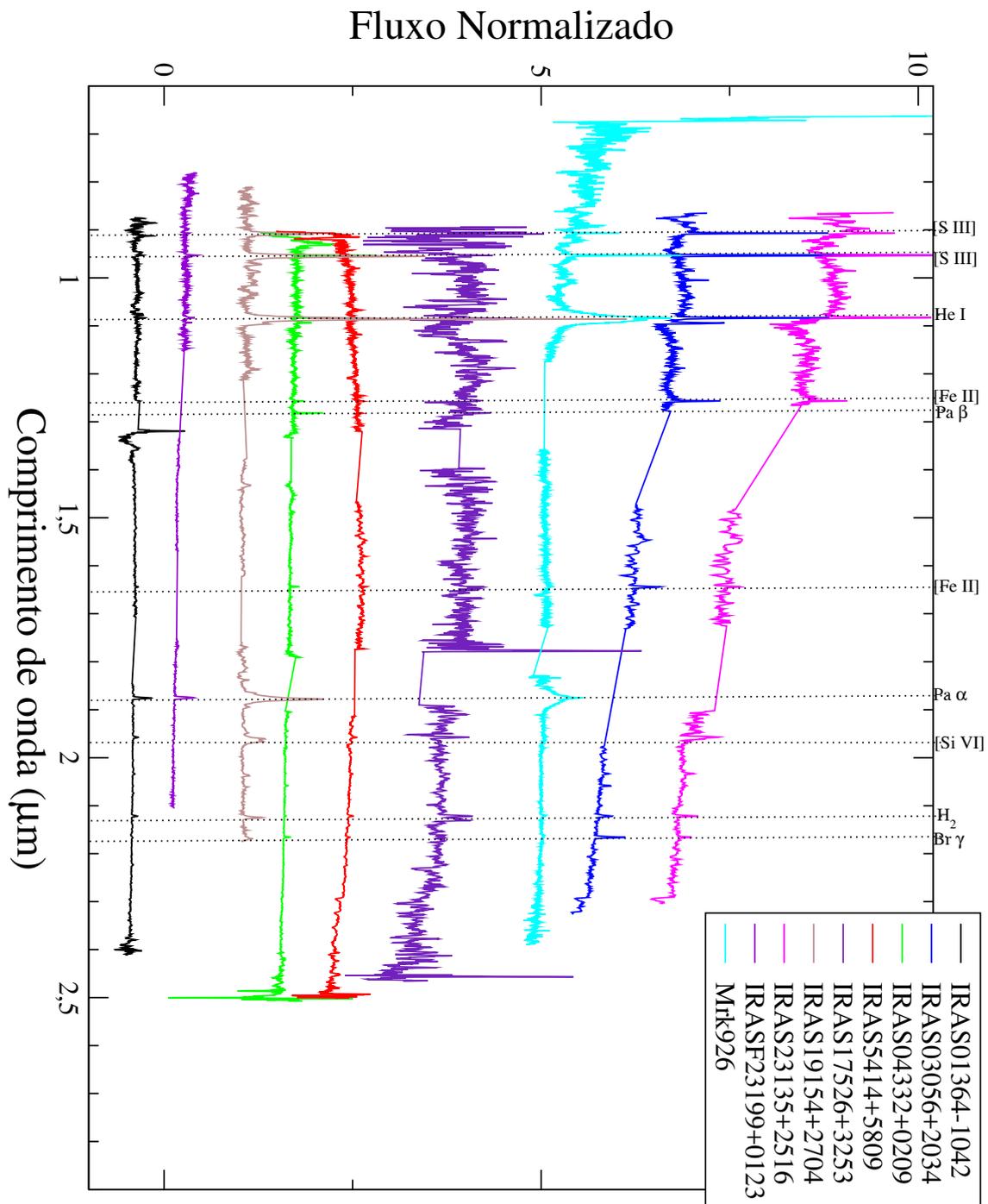


Figura 2.7: Espectros NIR da amostra de OHMG. Os espectros têm fluxos normalizados em  $1200 \text{ \AA}$  organizados de modo a ficar os mais inclinados em cima e os mais planos na base, a fim de obter uma visualização mais harmoniosa.

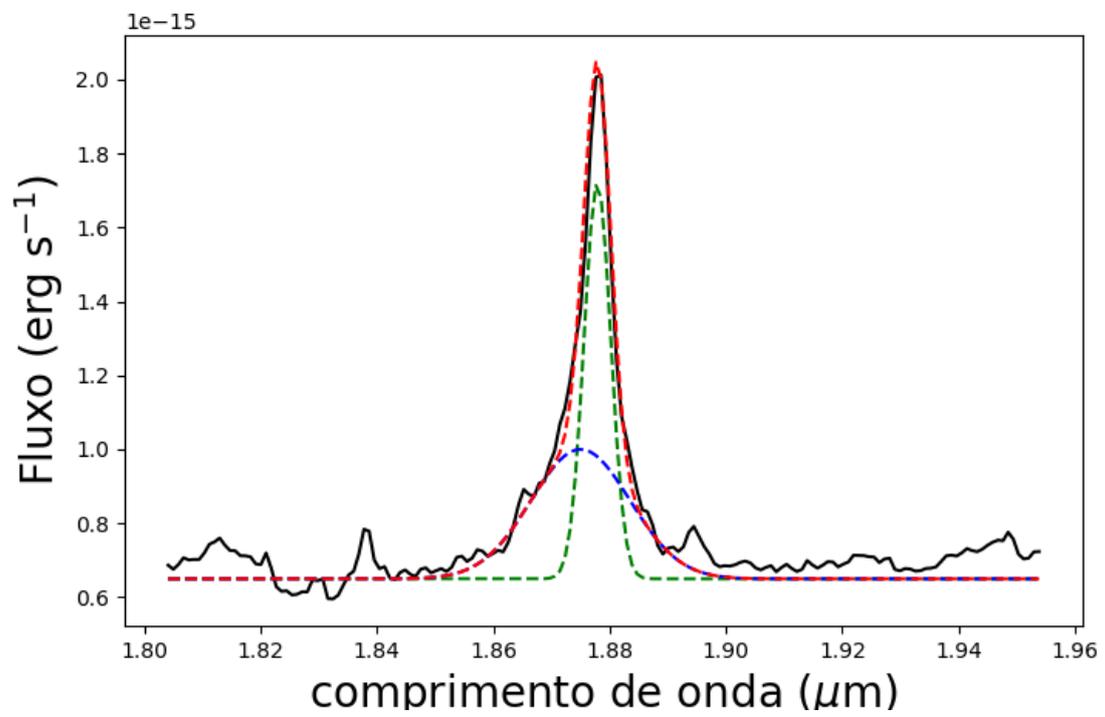


Figura 2.8: Exemplo de ajuste do perfil de linha da IRAS19154+2704. Linha de Pa $\alpha$  que apresenta alargamento, utilizou-se 2 gaussianas para traçar este perfil

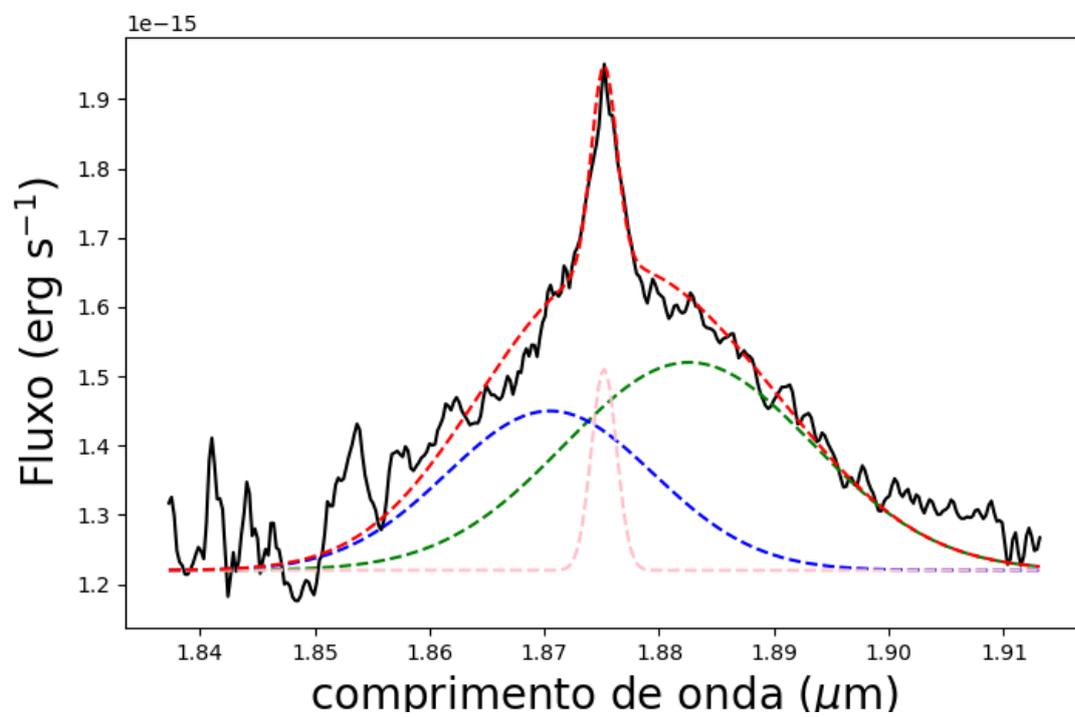


Figura 2.9: Exemplo de ajuste do perfil de linha da Mrk926. Linha de Pa $\alpha$  que apresenta alargamento. Utilizou-se 3 gaussianas para traçar este perfil

## Resultados e Discussões

### 3.1 Linhas de emissão na amostra de galáxias no infravermelho próximo

Um mapeamento feito por Riffel, R. et al. (2006) lista as linhas de emissões mais comuns no NIR (0.4-2.4 $\mu\text{m}$ ) em AGN e foi a base da identificação das linhas presente em nossa amostra de OHMGs. Para essa listagem Riffel, R. et al. (2006) utilizou dados espectrais de galáxias Seyfert 1 e 2, QUASARES e galáxias Starburst.

As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam espectros das OHMGs da amostra destacando algumas linhas de emissão (linhas pontilhadas) mais intensas nas bandas J, H e K. Os painéis exibem espectros nas bandas J, H e K respectivamente, as faixas de absorção atmosférica foram retiradas no intuito de obter uma melhor visualização das características presentes nos espectros da amostra.

A Figura 3.1 apresenta os espectros nas banda J, H e K de três galáxias da amostra IRAS01364-1042, IRAS03056+2034 e IRAS04332+0209. A galáxia IRAS01364-1042 apresenta bom sinal na banda K ( $\text{SNR}^1 \sim 2.18$ ), terceira coluna primeira linha do painel apresentado na Figura 3.1. A linha mais intensas na banda K desta galáxia é o  $\text{Pa}\alpha \lambda = 1,87 \mu\text{m}$  apresentando um fluxo igual a  $1,08 \times 10^{-14} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ , a linha mais fraca na mesma banda é o  $\text{Br}\gamma \lambda = 1,16 \mu\text{m}$  com fluxo igual a  $7,32 \times 10^{-16} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ , ou seja, duas ordens de grandeza menor que a linha anterior. Os fluxos de todas as linhas de emissão desta galáxia podem ser vistos na tabela 3.1 e seus respectivos ajustes no apêndice A.

A galáxia IRAS03056+2034 possui nas bandas J e K, (ver segunda linha da primeira e terceira coluna respectivamente na ver Figura 3.1), uma ótima razão sinal-ruído (5,31

---

<sup>1</sup> SNR: Signal to Noise Ratio do inglês Razão Sinal Ruído









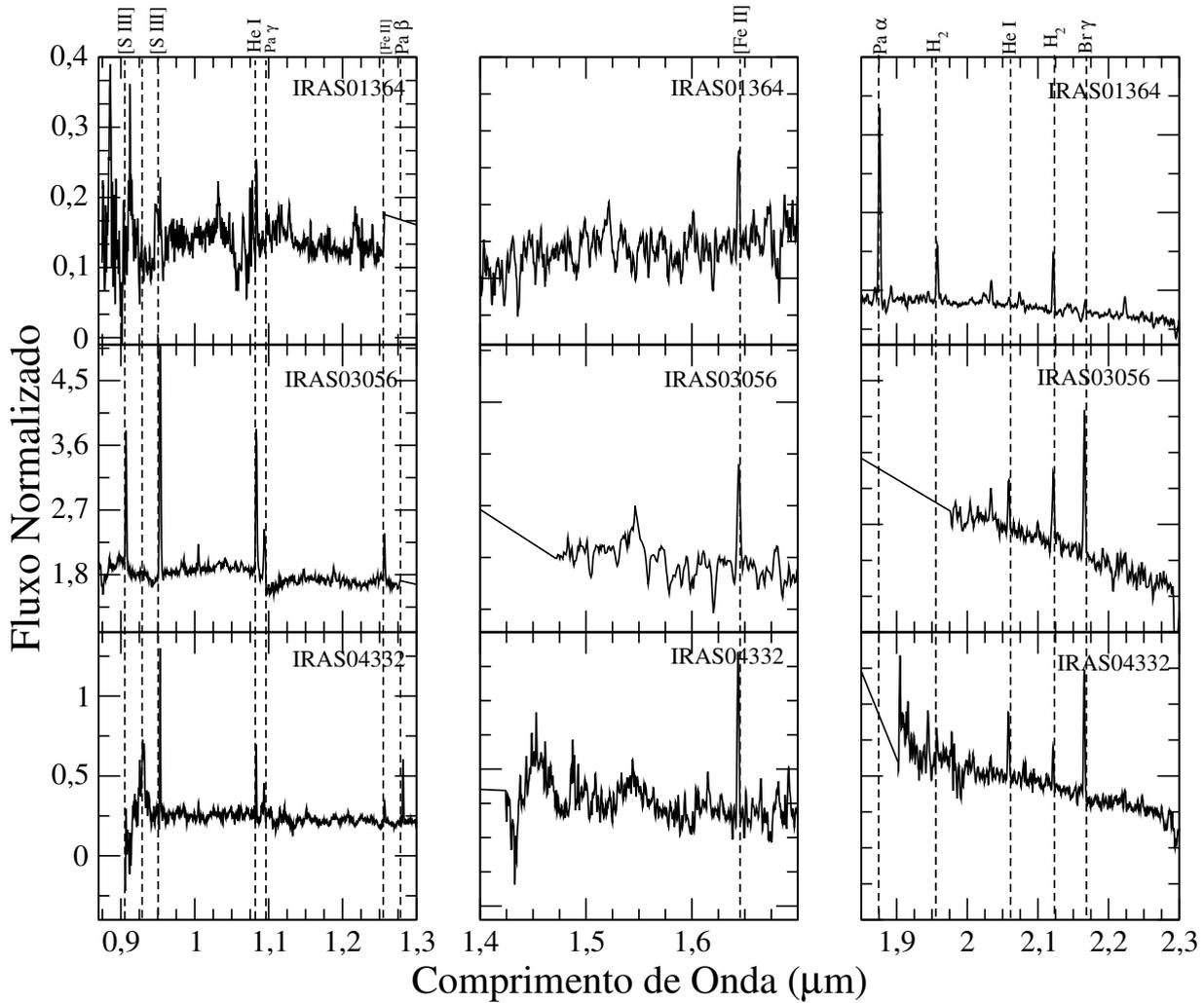


Figura 3.1: Espectros no NIR da nossa amostra de OHMG. Os espectros têm fluxos normalizados em  $1.2 \mu\text{m}$ . Os painéis esquerdos mostram a banda J, os painéis do meio e da direita apresentam as bandas H e K, respectivamente.

para a banda J e 6,42 para a banda K). Na banda J esta galáxia apresenta intensas linhas de emissão com destaque para a emissão proibida de  $[\text{S III}] \lambda$  em  $0,95 \mu\text{m}$  com fluxo de  $4,471 \times 10^{-14} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  e  $\text{He I} \lambda$   $1,08 \mu\text{m}$  com fluxo de  $5,4 \times 10^{-14} \text{erg s}^{-1}$ . Na banda K a IRAS03056+2034 apresenta emissão mais intensa nas linhas de  $\text{He I} \lambda$  em  $2,05 \mu\text{m}$ ,  $\text{H}_2 \lambda$  em  $2,12 \mu\text{m}$  e  $\text{Br} \gamma \lambda$  em  $2,16 \mu\text{m}$ . Os fluxos de todas as linhas de emissão desta galáxia podem ser vistos na tabela 3.1 e seus respectivos ajustes no apêndice A.

A galáxia IRAS04332+0209 também apresenta nas bandas J, H e K, fortes linhas de emissão. Na banda J as linhas mais intensas são o  $[\text{S III}] \lambda$  em  $0,95 \mu\text{m}$  com fluxo de  $2,29 \times 10^{-15} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  e a emissão proibida de  $[\text{Fe II}] \lambda$  em  $1,52 \mu\text{m}$  com fluxo de  $3,31 \times 10^{-15} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ . Na banda K a IRAS04332+0209 possui o fluxo na linha de emissão do  $\text{Br} \gamma \lambda$  em  $2,16 \mu\text{m}$  aproximadamente  $2,72 \times 10^{-15} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ .

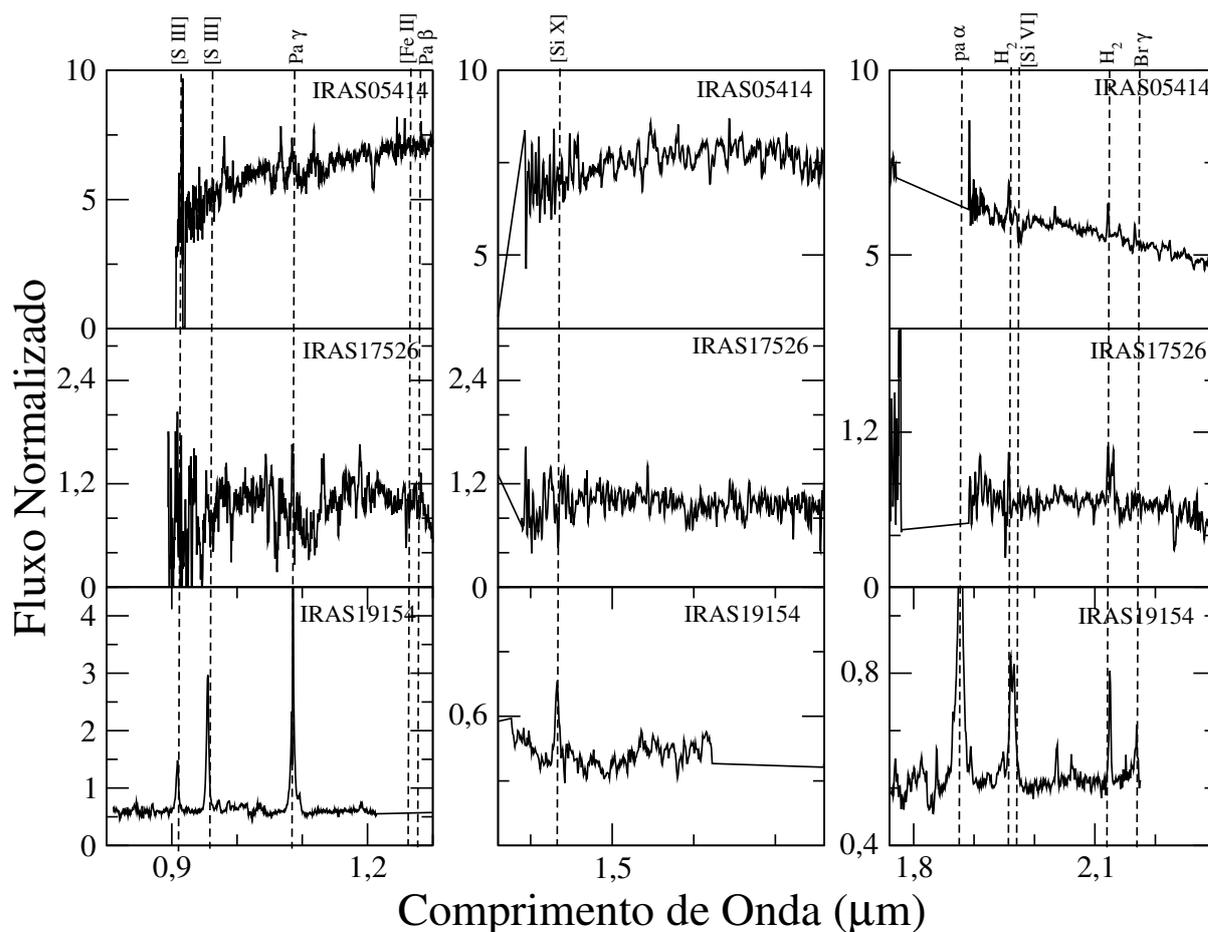


Figura 3.2: Espectros no NIR da nossa amostra de OHMG. Os espectros têm fluxos normalizados em  $1.2 \mu\text{m}$ . Os painéis esquerdos mostram a banda J, os painéis do meio e da direita apresentam as bandas H e K, respectivamente.

A Figura 3.2 mostra o espectro das galáxias IRAS05414+5809, IRAS17526+3253 e IRAS19154+2704. A galáxia IRAS05414+5809 apresenta um espectro com linhas menos intensas em comparação a IRAS19154+2704. Entretanto a IRAS05414+5809 apresenta emissão de  $\text{H}_2$  em dois comprimentos de onda diferentes,  $\text{H}_2 \lambda$  em  $1,94 \mu\text{m}$  e  $\text{H}_2 \lambda$  em  $2,12 \mu\text{m}$ , ambos na banda K com fluxos de  $2,55 \times 10^{-15} \text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-2}$  e  $1,35 \times 10^{-15} \text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-2}$ . É notório que a banda K da galáxia IRAS05414+5809 apresenta algumas linhas de absorção que não foram discriminadas na Figura 3.2. Os fluxos de todas as linhas de emissão destas galáxias podem ser vistos na tabela 3.1 e seus respectivos ajustes no apêndice A.

A galáxia IRAS17526+3253 apresenta a razão sinal-ruído muito pequena (3,00; 6,16 e 2,45 para as bandas J, H e K respectivamente), como consequência poucas linhas puderam ser detectadas no espectro desta galáxia. Entretanto, é possível notar linhas de emissão

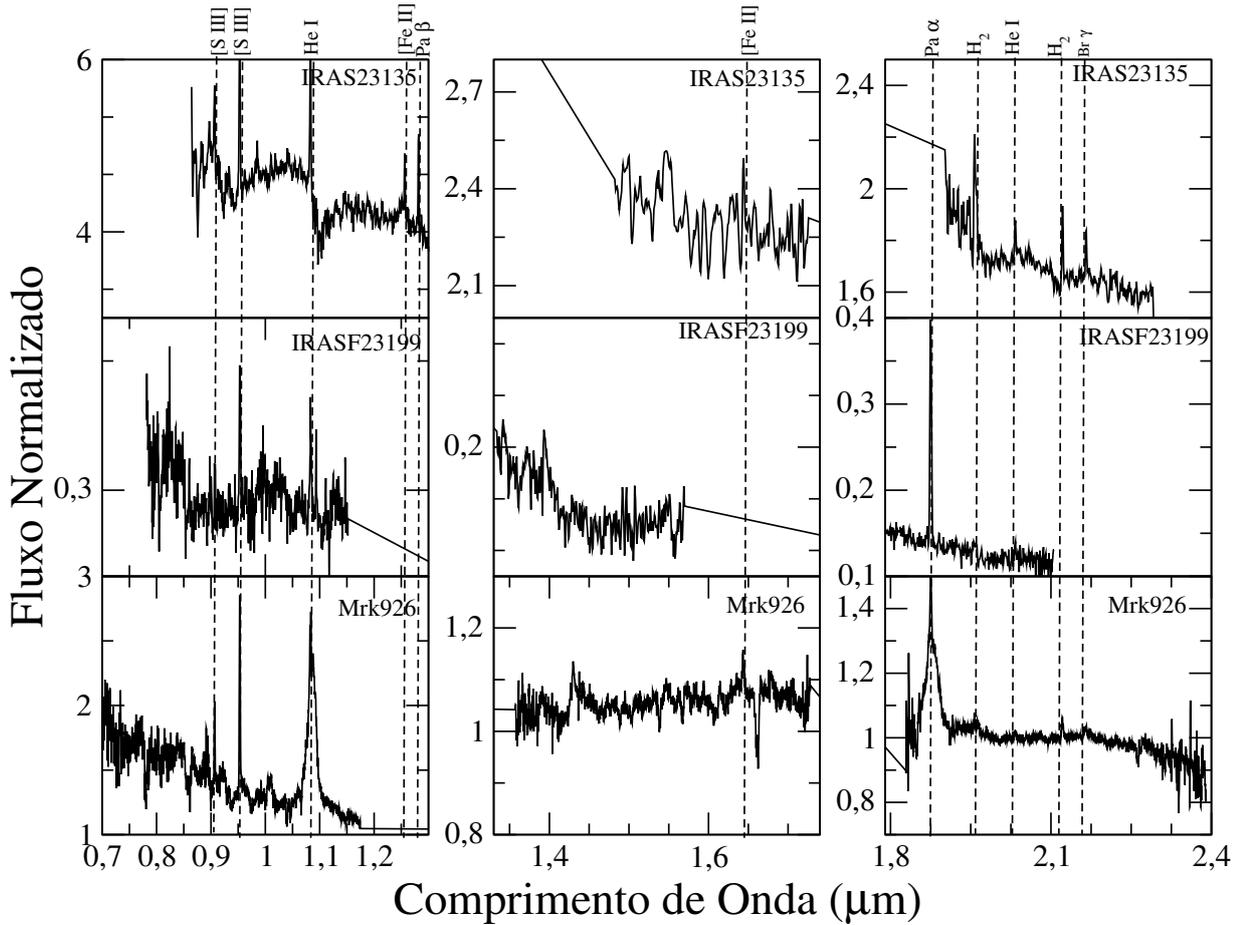


Figura 3.3: Espectros no NIR da nossa amostra de OHMG. Os espectros têm fluxos normalizados em  $1.2 \mu\text{m}$ . Os painéis esquerdos mostram a banda J, os painéis do meio e da direita apresentam as bandas H e K, respectivamente.

como  $\text{H}_2 \lambda$  em  $2,12 \mu\text{m}$  e  $\text{Mg II} \lambda$  em  $2,13 \mu\text{m}$ . Estas linhas de emissão não foram descritas na Figura 3.2. Os fluxos de todas as linhas de emissão destas galáxias podem ser vistos na tabela 3.1 e seus respectivos ajustes no apêndice A.

A galáxia IRAS19154+2704 apresenta intensas linhas de emissão nas três bandas do NIR (J, H e K). Na banda H, a galáxia IRAS19154+2704 apresenta três linhas de emissão bastante intensas, são elas:  $[\text{S III}] \lambda$  em  $0,90 \mu\text{m}$  com fluxo de  $5,29 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ,  $[\text{S III}] \lambda$  em  $0,95 \mu\text{m}$  com fluxo de  $1,31 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  e  $\text{He I} \lambda$  em  $1,08 \mu\text{m}$  com fluxo de  $1,88 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ . Esta galáxia também apresenta intensas linhas coronais, são elas:  $[\text{Si X}] \lambda$  em  $1,43 \mu\text{m}$  com fluxo  $1,29 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  e o  $[\text{Si VI}] \lambda$  em  $1,96 \mu\text{m}$  com fluxo de  $51,86 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ , percebam que essas linhas coronais possuem alto potencial de ionização (360 eV, Riffel, R. et al., 2006) e é importante ressaltar que tais linhas são indicadores de SMBH (Rodríguez-Ardila e Mazzalay, 2006; Riffel, R. et al.,

2006).

Além disso, a IRAS19154+2704 apresenta componentes alargadas nas linha de recombinação do Hidrogênio sendo que a linha  $\text{Pa}\alpha\lambda$  e  $1,87\mu\text{m}$  possui a FWHM de aproximadamente  $1411\text{ km s}^{-1}$ . É possível conferir o ajuste da linhas  $\text{Pa}\alpha\lambda$   $1,87\mu\text{m}$  da IRAS19154+2704 na Figura 2.8, note que o ajuste em questão foi realizado utilizando duas gaussianas (linhas verdes da Figura 2.8). As informações derivadas destes ajustes estão apresentadas nas Tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

Na Figura 3.3 são apresentadas os três últimos espectros da amostra, o espectro da IRAS23135+2516, da IRASF23199+0123 e da Mrk926. Os fluxos de todas as linhas de emissão destas galáxias podem ser vistos na tabela 3.1 e seus respectivos ajustes no apêndice A.

A IRAS23135+0123, apresenta linhas bem intensas na banda J com emissão de  $[\text{S III}]\lambda$  em  $0,90\mu\text{m}$  com fluxo de  $2,74\times 10^{-14}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ ,  $[\text{S III}]\lambda$  em  $0,95\mu\text{m}$  com fluxo de  $4,74\times 10^{-14}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$  e  $\text{He I}\lambda$  em  $1,08\mu\text{m}$  com fluxo de  $4,63\times 10^{-14}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ . Na banda K a IRAS23135+0123 apresenta linhas de absorção (não discriminadas na Figura 3.3) e algumas linhas de emissão como  $\text{H}_2\lambda$  em  $1,95\mu\text{m}$  com fluxo de  $3,41\times 10^{-14}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ ,  $\text{H}_2\lambda$  em  $2,12\mu\text{m}$  com fluxo de  $1,01\times 10^{-14}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$  e  $\text{Br}\gamma\lambda$  em  $1,95\mu\text{m}$  com fluxo de  $3,41\times 10^{-14}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ .

A IRASF23199+0123 apresenta bastante ruído em seu espectro ( $\text{SNR} \sim 5,49$ ;  $4,97$  e  $4,67$  para as bandas J, H e K respectivamente), porém, as poucas linhas de emissão observadas possuem grande intensidade, sendo a linha de  $\text{Pa}\alpha\lambda$  em  $1,87\mu\text{m}$  a que apresenta a maior intensidade de fluxo, alcançando o valor de  $\sim 1,29\times 10^{-15}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ .

Por último temos a galáxia Mrk926, sua observação foi feita a nível de calibração instrumental pois ela é uma galáxia Seyfert bastante estudada no óptico (e.g. Osterbrock, 1989). A Mrk926 apresenta duas componentes alargadas na linha de emissão  $\text{Pa}\gamma$ , com fluxo de  $1,95\times 10^{-15}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$  e  $\text{Pa}\alpha$  com fluxo de  $1,29\times 10^{-14}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ . A linha de  $\text{H}_2\lambda$  em  $2,12\mu\text{m}$  possui fluxo muito tênue alcançando um limite superior em fluxo de  $3,47\times 10^{-15}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ .

A Figura 3.4 apresenta uma análise quantitativa das linhas de emissão presentes na amostra. Nesta amostra as linhas de recombinação do Hidrogênio,  $\text{Pa}\beta$  em  $1,2\mu\text{m}$  e  $\text{Pa}\alpha$  em  $1,87\mu\text{m}$ , aparacem em grande parte dos espectros das nossa amostra sendo que a linhas  $\text{Pa}\beta$  apresenta uma frequência de 55% e a linha  $\text{Pa}\alpha$  em  $1,87\mu\text{m}$  em 44% das galáxias,

respectivamente. Por outro lado, a linha de hidrogênio molecular  $H_2$  em  $2,21\mu m$  esta presente em 88% das galáxias da amostra (ver o pico máximo da Figura 3.4). Linhas com alto potencial de ionização como o  $[Fe II]$  estão presentes em 55% da nossa amostra.

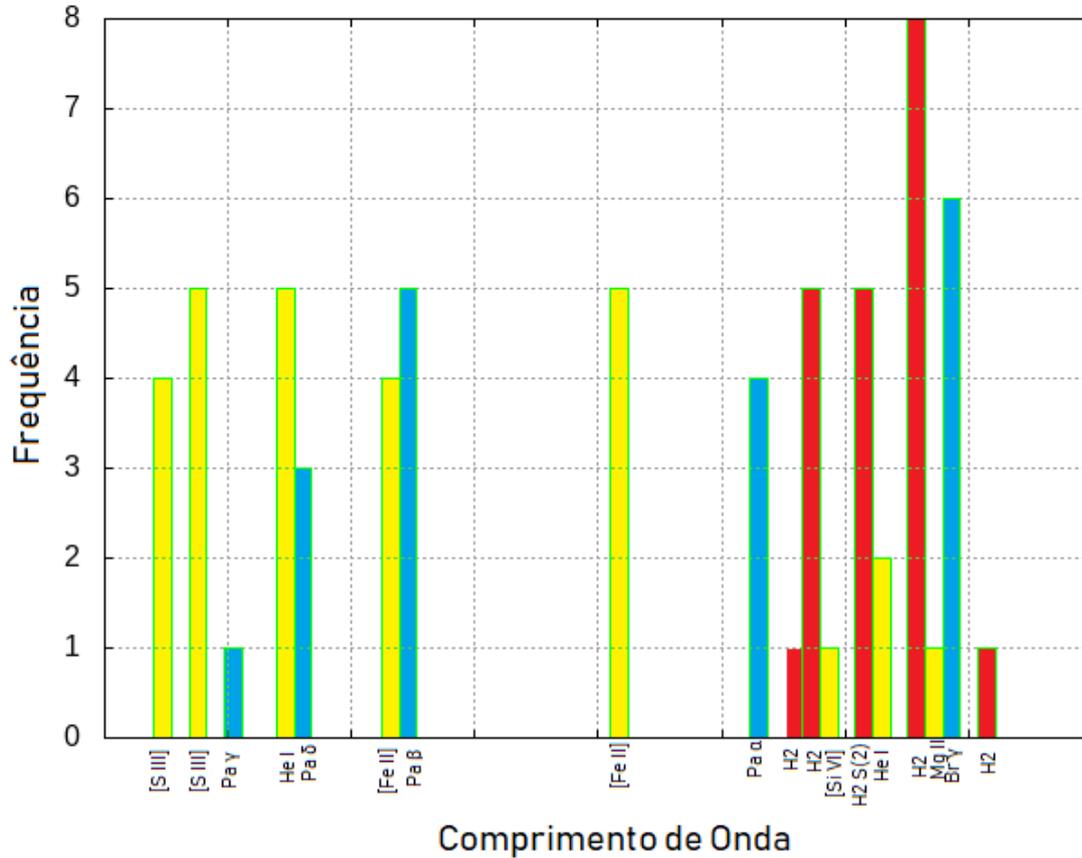


Figura 3.4: Histograma mostrando a frequência com a qual aparece linhas de emissão na amostra. As linhas de emissão estão identificadas na ordem crescente em comprimento de onda. Barras amarelas representam emissões proibidas, barras em azuis linhas de recombinação do Hidrogênio e as barras em vermelho linhas moleculares.

Outra linha frequentemente observada na nossa amostra foi a linha de He I que aparece em 55% das galáxias da amostra. A emissão de  $[Si X]$  em  $1,43\mu m$  e  $[Si IV]$  em  $1,96\mu m$  e a linha de Mg II em  $2,13\mu m$  foram identificadas apenas em duas fontes da amostra, nas galáxias IRAS19154+2704 e IRAS17526+3253, respectivamente.

Apenas duas galáxias, IRAS19154+2704 e Mrk926, apresentam componentes alargadas nas linhas de HI e em ambas o alargamento ocorre nas linhas de Pa  $\gamma$  em  $1,09\mu m$  e Pa  $\alpha$  em  $1,87\mu m$ . Na galáxia IRAS19154+2704 essas linhas possuem FWHM de  $\sim 1946\text{ km s}^{-1}$  e  $\sim 2595\text{ km s}^{-1}$ , respectivamente. Na galáxia Mrk926 essas linhas alcançam valores de FWHM de  $\sim 3376\text{ km s}^{-1}$  para componente avermelhada do Pa  $\gamma$  e  $\sim 3360\text{ km s}^{-1}$  para a

componente azulada de Pa $\gamma$ . A componente azulada de Pa $\alpha$  da Mrk926 tem FWHM de  $\sim 4169 \text{ km s}^{-1}$  enquanto a componente avermelhada alcançou valores de  $\sim 4089 \text{ km s}^{-1}$ .

### 3.2 Linhas de absorção

Linhas de absorção são caracterizadas quando a radiação emitida por uma fonte quente atravessa um ambiente mais frio. Por isso, quando as radiações são oriundas de estrelas obtém-se um espectro de absorção, isso ocorre pois estrelas possuem uma atmosfera que em média é mais fria do que núcleo estelar KUTNER (2003).

A Figura 3.5 exibe linhas de absorção observadas em algumas OHMGs da amostra. Os elementos, Na I e a tríplice linhas de carbono presentes nesta imagem são características de uma formação estelar jovem ( $\leq 1$  Giga-anos) ou intermediária ( $\sim 1 - 10$  Giga-anos). Para compreender mais sobre a população estelar se faz necessário um estudo mais aprofundado da população e cinemática estelar e este trabalho não objetivou as propriedades da população estelar da amostra de estudo. Uma revisão sobre população estelar em galáxias pode ser encontrado em Conroy (2013) e Mould (1982).

### 3.3 Fonte Dominante de Excitação das OHMGs

A fonte de excitação do gás e poeira das galáxias OHMGs são pobremente estudadas na literatura e os estudos disponíveis até o presente possuem uma grande discrepância e ainda mantém inconclusivo ao responder qual é a fonte dominante de excitação do gás e poeira, AGNs ou starburst?

Estudos espectroscópicos em comprimento de onda do óptico concluíram que existe uma alta fração de AGNs (70%) em uma amostra de 40 OHMGs (Darling e Giovanelli, 2006; Baan et al., 1998). Em contraste, estudo em comprimento de onda do rádio, IR médio e raio-X sugerem uma incidência melhor para a presença de AGNs (10-30%, ver Baan e Klöckner, 2006; Willett et al., 2011; Vignali et al., 2005; Sales et al., 2015, 2019). As razões para essa discrepância não são claras, possibilidades incluem resolução espacial dos dados, onde um AGN pode co-existir com um starburst circum-nuclear, ou uma atribuição errada na classificação dos dados dos óptico, pois em galáxias que possuem choques associados com uma intensa formação estelar podem imitar as razões de linhas de emissão de galáxias LINERs (Baan et al., 1998; Baan e Klöckner, 2006; Kewley et al., 2006; Sales et al., 2015,

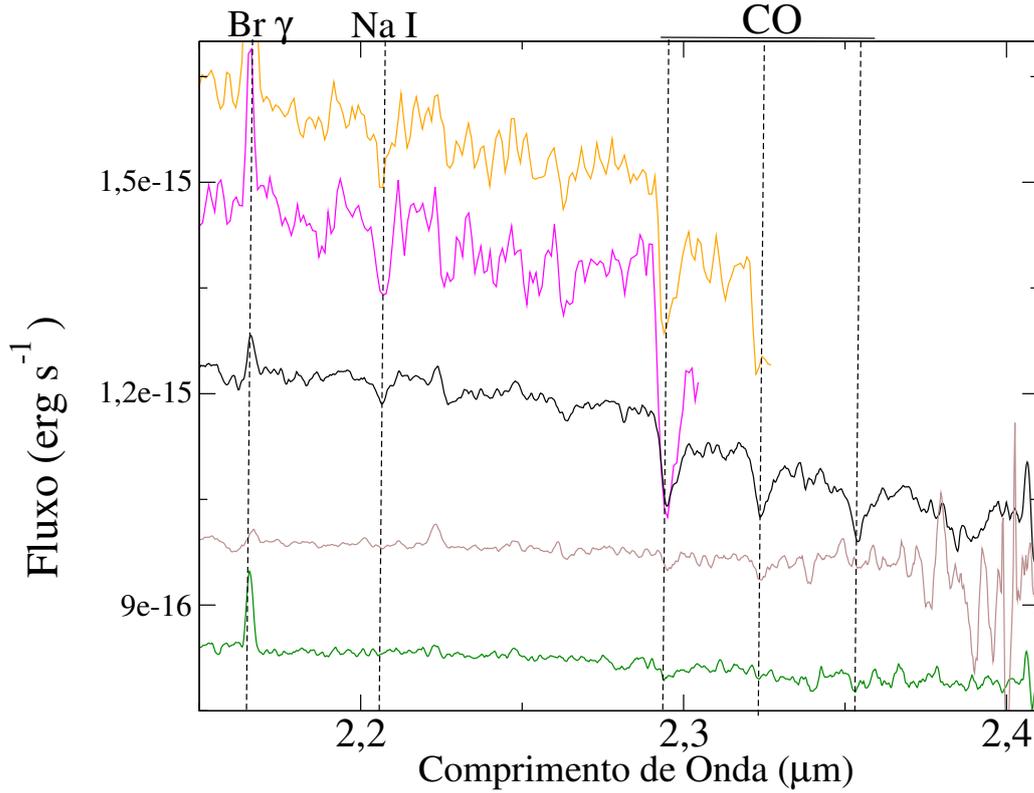


Figura 3.5: Espectros unidimensionais de nossa amostra destacando linhas de absorção de CO (linhas tracejadas) em  $2,29 \mu\text{m}$ ,  $2,32 \mu\text{m}$  e  $2,35 \mu\text{m}$ . Espectro representado em cor amarela mostra corresponde a galáxia IRAS03056+2034, em rosa a IRAS23135+2516, em preto a IRAS05414+5840, em marrom a IRAS01364-1042 e em verde a galáxia IRAS332+0209.

2019).

O intervalo espectral do NIR cobre uma quantidade importante de indicadores que podem ser usados para diagnosticar tanto a excitação da poeira quente ( $\sim 1500\text{K}$ ) e gás ionizado quanto o Hidrogênio molecular (Rodríguez-Ardila et al., 2011; Riffel et al., 2006; Rodríguez-Ardila e Mazzalay, 2006; Marinello et al., 2016). Trabalhos recentes mostraram que linhas proibidas com alto potencial de ionização (125-450 eV), também conhecidas como linhas coronais (e.g. [SVIII], [FexIII], [SIX] e [Six]) são assinaturas claras de atividade de AGNs, sendo detectadas em 67% de AGNs, entretanto elas são completamente ausentes em galáxias starburst (Rodríguez-Ardila et al., 2011; Riffel et al., 2006).

Entretanto, nenhum estudo espectroscópico no NIR de OHMGs foi explorado até a presente data. Portanto, neste trabalho iremos, pela primeira vez, derivar as propriedades física de galáxias OHMGs no NIR. Nossa amostra é composta por 9 galáxias, porém, este estudo faz parte de uma análise maior com dados em múltiplos comprimentos de onda de uma amostra composta por  $\sim 80$  OHMGs locais ( $z < 0,26$ ).

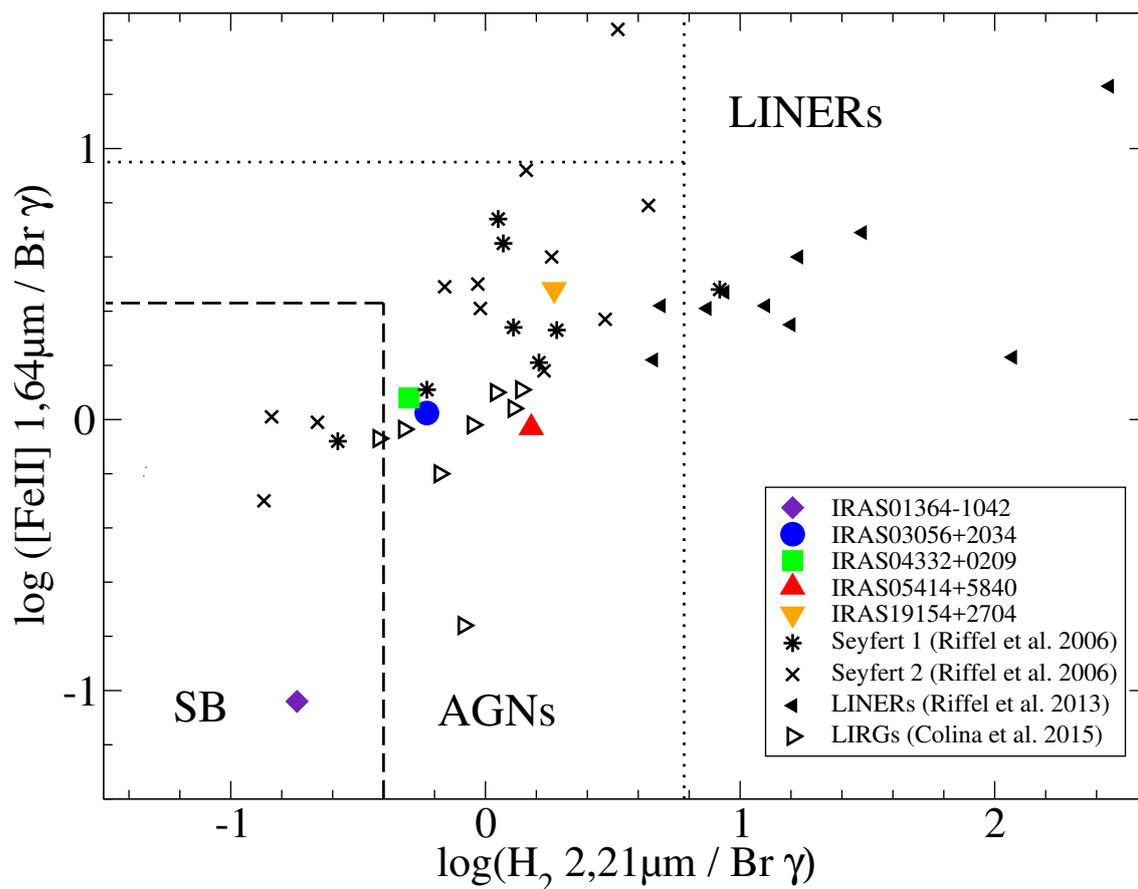


Figura 3.6: Diagrama de diagnóstico das razões de linhas  $H_2/Br\gamma$  versus  $[FeII]/Br\gamma$ . Diamante, círculo, quadrado, triângulo voltado para cima e triângulo voltado para baixo estão representando as galáxias OHMGs da nossa amostra. Triângulos voltados para a esquerda e direita são galáxias LINERs e LIRGs retiradas de Colina et al. (2015) e Riffel et al. (2013), respectivamente. Asteriscos e símbolos “x” representam galáxias Seyferts 1 e 2 retiradas do trabalho de Riffel et al. (2006).

Rodríguez-Ardila et al. (2011) e Riffel et al. (2006) estudaram cerca de 100 galáxias para construir diagramas de diagnósticos compostos por linhas permitidas, proibidas e linhas do Hidrogênio molecular para determinar quais razões de linhas possibilita distinguir galáxias dominadas por AGNs ou Starburst (ver também Rodríguez-Ardila et al., 2004; Larkin et al., 1998; Rigopoulou et al., 1999; Colina et al., 2015; Mason et al., 2013). Os diagramas de diagnósticos no NIR sugeridos por esses autores usam as razões  $H_2/Br\gamma$  versus  $[FeII]/Pa\beta$  e também as razões  $H_2/Br\gamma$  versus  $[FeII]/Br\gamma$ , pois essas razões tornam possível separar regiões dominadas por AGNs e Starburst.

A Figura 3.6 exibe o diagrama de diagnóstico proposto por Colina et al. (2015) ( $H_2/Br\gamma$  versus  $[FeII]/Br\gamma$ ) para as galáxias OHMGs da nossa amostra. Para comparação também mostramos nessa figura as galáxias LIRGs, LINERs e Seyferts retiradas dos trabalhos de Colina et al. (2015) e Riffel et al. (2013, 2006). Os resultados do estudo espectroscópico

de 10 LIRGs com dados de campo integral obtidos com o SINFONI/VLT desenvolvido por Colina et al. (2015) podem ser comparados com os dados de fenda longa obtidos com o SpeX/IRTF após os autores integrarem os fluxos das linhas a uma escala espacial semelhante ( $<1$  kpc). Portanto, os dados retirados de Colina et al. (2015) e Riffel et al. (2013, 2006) podem ser comparados com os dados da nossa amostra de galáxias OHMGs.

Colina et al. (2015) ao estudar dados de campo integral de 10 LIRGs determinou regiões do diagrama de diagnóstico  $H_2 2,1\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$  versus  $[\text{FeII}]1,6\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$  onde as galáxias podem ser divididas em três fontes de excitação, são elas: Starburst, AGNs e LINERs (ver Figura 3.6). Podemos perceber que as OHMGs da nossa amostra se distribuem nas regiões de fontes dominadas por AGNs e Starburst. Através desse diagrama de diagnóstico no NIR podemos concluir que a galáxia IRAS01364–1042 é dominada por ionização de fonte Starburst, enquanto as galáxias IRAS03056+2034, IRAS04332+0209, IRAS05414+5840 e IRAS19154+2704 são galáxias OHMGs que hospedam AGNs (ver Figura 3.6).

É importante lembrar que o diagrama proposto por Colina et al. (2015) que está sendo mostrado na Figura 3.6 é uma adaptação do diagrama de diagnóstico proposto por Rodríguez-Ardila et al. (2011); Riffel et al. (2006, 2008), onde a razão de linha do  $[\text{FeII}]1,2\mu\text{m}/\text{Pa}\beta$  foi substituído pela razão de linha  $[\text{FeII}]1,6\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$ . Isso foi necessário para adaptar o diagrama aos dados dos autores. Também é importante relembrar que as linhas de recombinação do hidrogênio  $\text{Br}\gamma$  e  $\text{Pa}\beta$  não foram corrigidos por avermelhamento e para fim de comparação a mesma metodologia foi empregada aos dados da nossa amostra.

A Figura 3.7 mostra outro diagrama de diagnóstico no IR próximo proposto inicialmente por Larkin et al. (1998) e testado para uma grande ( $\sim 60$  fontes) amostra de galáxias ativas por Rodríguez-Ardila et al. (2004) e Riffel et al. (2006). Nesta figura mostramos as galáxias OHMGs da nossa amostra, sendo que IRAS05414+5840 apresentou a classificação de AGN em ambos diagramas de diagnóstico (ver Figura 3.6 e 3.7) corroborando com os resultados de Véron-Cetty, M.-P. e Véron, P. (2006). Para comparação também mostramos nessa figura as galáxias LINERs e Seyferts retiradas dos trabalhos de Riffel et al. (2013, 2006). É possível perceber que existem duas galáxias Seyfert 2 e uma galáxia Seyfert 1 da amostra de Riffel et al. (2006) que estão localizadas na região de galáxias Starburst, ressaltando assim também uma possível co-existência das duas atividades nessas galáxias.

Entretanto, as OHMGs IRAS03056+2034 e IRAS04332+0209 estavam na região de AGNs no diagrama  $H_2/\text{Br}\gamma$  versus  $[\text{FeII}]1,6\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$  e deslocaram para a região de Star-

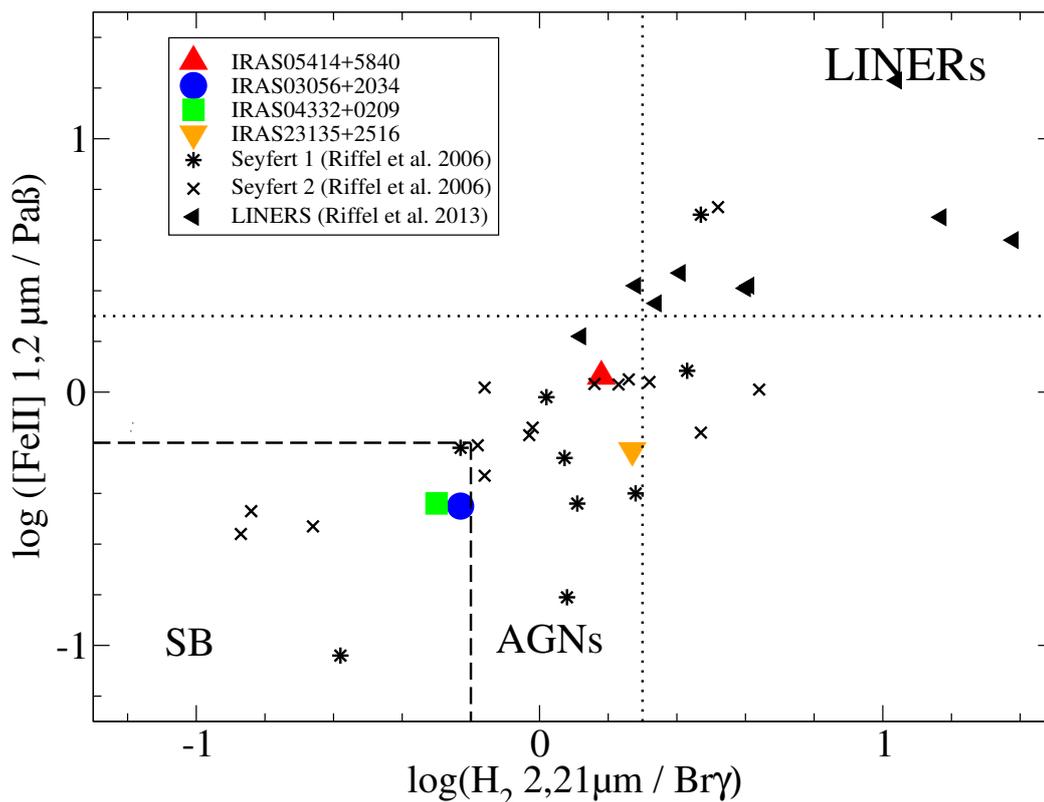


Figura 3.7: Diagrama de diagnóstico das razões de linhas  $H_2/Br\gamma$  versus  $[FeII]/Pa\beta$ . Círculo, quadrado, triângulo voltado para cima e triângulo voltado para baixo estão representando as galáxias OHMGs da nossa amostra. Triângulos voltados para a esquerda são galáxias LINERs retiradas de Riffel et al. (2013). Asteriscos e símbolos “x” representam galáxias Seyferts 1 e 2 retiradas do trabalho de Riffel et al. (2006).

burst no diagrama  $H_2/Br\gamma$  versus  $[FeII]1,2\mu m/Pa\beta$ . Este fato pode ser um indicador da coexistência de atividades Starburst e AGNs nessas galáxias. Esse resultado corrobora com os derivados por Hekatelyne et al. (2018), onde os autores encontraram através de dados no óptico observados com GMOS/IFU do telescópio Gemini a presença de ambas atividades Starburst e AGN na OHMGs IRAS03056+2034.

Resumimos a classificação das fontes de ionização da amostra de OHMGs observadas com o SpeX/IRTF e LIRIS/WHT e a tabela 3.5 exhibe esses resultados. Na terceira coluna desta tabela descrevemos qual foi o método utilizado para a predominância da fonte excitação da nossa amostra. A classificação se deu através de dois métodos distintos a fim de derivar a fonte ionizante do maior número de galáxias da nossa amostra.

O primeiro método se baseou na presença das linhas com alto potencial de ionização e na cinemática das linhas de recombinação do hidrogênio onde valores de FWHM foram convertidos para velocidades em  $km\ s^{-1}$  (ver Rodríguez-Ardila et al., 2011; Rodríguez-Ardila e Mazzalay, 2006; Riffel et al., 2006). O segundo método foi baseado nos diagramas

de diagnóstico das razões de linhas  $H_2/Br\gamma$  versus  $[FeII]/Br\gamma$  e  $H_2/Br\gamma$  versus  $[FeII]/Pa\beta$  sugerido por Colina et al. (2015) e Rodríguez-Ardila et al. (2011); Rodríguez-Ardila e Mazzalay (2006); Riffel et al. (2006), respectivamente (ver Figuras 3.6 e 3.7).

A partir dos diagramas apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7 foi possível classificar seis das nove OHMGs da nossa amostra. Entre essas galáxias a OHMG IRAS01364–1042 foi classificada como galáxia Starburst, enquanto as OHMGs IRAS03056+2034 e IRAS04332+0209 foram classificadas como compostas onde núcleos Starburst possivelmente co-existem com AGNs (ver Tabela 3.5).

A classificação derivada dos valores da FWHM dos perfis de linhas de recombinação do Hidrogênio possibilitou não apenas classificar galáxias Seyfert mas também distingui-las entre tipo 1, 2 ou intermediário (1.5 e 1.9).

A Figura 3.8 mostra um histograma da frequência com a classificação das fontes de ionização do gás e da poeira na amostra de 9 OHMGs estudadas neste trabalho. Quantificamos que  $\sim 56\%$  da nossa amostra é composta por galáxias Seyferts, 22% de galáxias Starburst e 22% de fonte de ionização composta por Starburs e AGNs. Esta frequência derivada utilizou resultados prévios com dados de campo integral no óptico GMOS/IFU do telescópio Gemini realizado por co-autores neste estudo Hekatelyne et al. (2018) e Sales et al. (2019).

### 3.4 *Avermelhamento das galáxias da amostra*

Um método bastante comum ao estudar extinção em AGNs é utilizar razões dos fluxos de linhas específicas. Na maioria dos casos essas razões são calculadas com as linhas de recombinação do Hidrogênio, porém, em alguns casos, as linhas de recombinação do Hidrogênio são a melhor opção para o cálculo deste avermelhamento (Riffel et al., 2006).

Um método para derivar este avermelhamento é proposto por Rodríguez-Ardila et al. (2004) e utiliza linhas de emissão proibida do Ferro ( $[Fe II] 1,25 \mu m / 1,64 \mu m$ ). Ao utilizar as razões de linhas proibidas é necessário se atentar a três requisitos, elas necessariamente precisam ser do mesmo íon, possuir uma grande separação em comprimento de onda e compartilharem do mesmo nível superior (Riffel et al., 2006).

Satisfazendo estes pré-requisitos, obter o avermelhamento a partir destas razões de linha torna-se muito vantajoso pois as razões obtidas por meio destas linhas estarão apenas em

Tabela 3.5 - Classificação das galáxias da amostra de OHMGs.

Galáxias	Atividade	Método Utilizado
IRAS01364-1042	Starburst	diagrama de diagnóstico
IRAS03056+2034	AGN+SB <sup>a</sup>	diagrama de diagnóstico
IRAS04332+0209	AGN+SB	diagrama de diagnóstico
IRAS05414+5840	Seyfert 2	diagrama de diagnóstico / análise dos perfis de linhas
IRAS17526+3253	Starburst	Retirado de Sales et al. (2019)
IRAS19154+2704	Seyfert 1.9	diagrama de diagnóstico / análise dos perfis de linhas
IRAS23135+2516	Seyfert 2	diagrama de diagnóstico / análise dos perfis de linhas
IRASF23199+0123	Seyfert 1	Retirado de Hekatejlyne et al. (2018)
Mrk926	Seyfert 1	análise dos perfis de linhas

<sup>a</sup> Essa mesma classificação foi encontrada por Hekatejlyne et al. (2018) usando dados no óptico do GMOS/IFU.

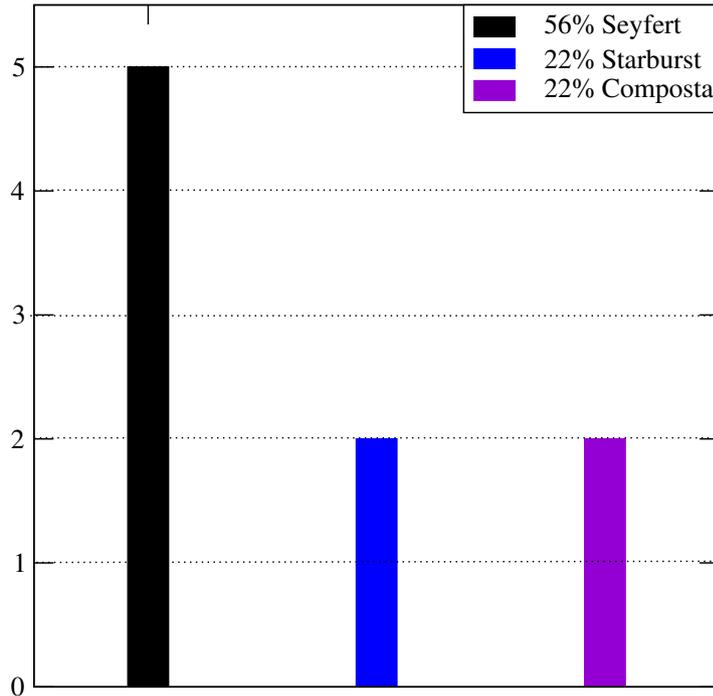


Figura 3.8: Histograma da frequência de classificação da fonte ionizante da amostra de OHMGs. Valores referentes a galáxias Seyfert, Starburst e fontes compostas em porcentagem estão mostradas por barras preta, azul e roxa, respectivamente.

função das probabilidades de transição (Riffel et al., 2006).

A fim de uma análise mais completa do avermelhamento da nossa amostra de OHMGs utilizamos um diagrama de avermelhamento proposto por Riffel et al. (2006), o qual objetiva comparar o avermelhamento calculado pelas linhas de recombinação do Hidrogênio com as linhas de  $[\text{Fe II}]$ .

Este diagrama pode ser visto na Figura 3.9, onde a razão das linhas de recombinação do Hidrogênio  $\text{Br}\gamma/\text{Pa}\beta$  versus a razão de linhas do  $[\text{Fe II}]_{1,2\mu\text{m}}/[\text{Fe II}]_{1,6\mu\text{m}}$  são mostradas. Nesta figura podemos perceber que as OHMGs da nossa amostra são representadas por quadrados roxos e as galáxias Seyfert 1, Seyfert 2 e Starburst retiradas de Riffel et al. (2006) são representados por “x”, círculo fechado e abertos respectivamente. A linha contínua preta corresponde a uma sequência de avermelhamentos onde o limite superior equivale a  $E(\text{B-V})=0$  e o limite inferior a  $E(\text{B-V})=2$  mag. Os diamantes vazios representam valores teóricos assumidos em passos  $E(\text{B-V})=0.5$  mag, assumindo a lei de avermelhamento proposto por Cardelli et al. (1989).

Com o auxílio da Figura 3.9 podemos notar que as OHMGs da nossa amostra tendem

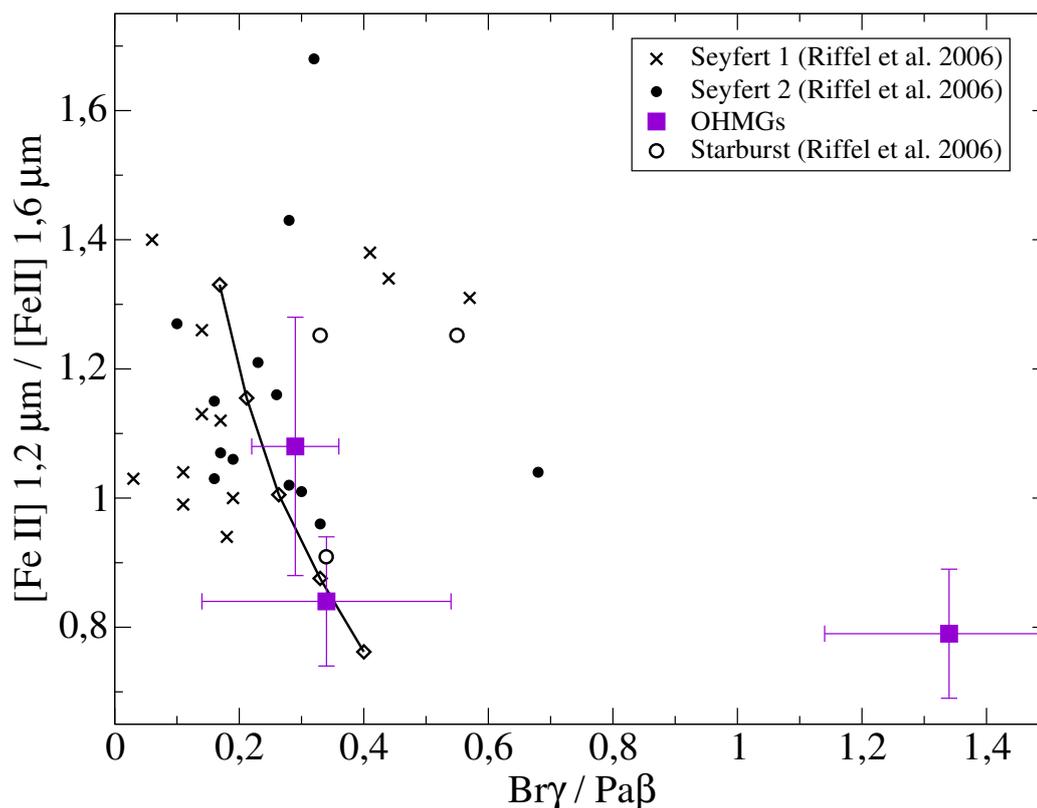


Figura 3.9: Diagrama com as razões de linhas de  $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$  versus  $[\text{Fe II}]_{1,2\mu\text{m}}/[\text{Fe II}]_{1,6\mu\text{m}}$ . Os quadrados roxos representam OHMGs da nossa amostra. Círculos fechados e abertos representam galáxias Seyfert 2 e Starburst retiradas de Riffel (2008). Símbolos “x” representam galáxias Seyfert 1 retiradas de Riffel (2008). A linha contínua preta corresponde a uma sequência de avermelhamento de  $E(B-V)=0$  (diamante do limite superior) até  $E(B-V)=2$  mag. Os diamantes são valores teóricos em passos de  $E(B-V)=0,5$  mag.

a se aproximar do limite inferior ( $E(B-V)=2$  mag) da razão das linhas de  $[\text{Fe II}]$  em comparação com as galáxias da amostra de Riffel et al. (2006). A razão calculada com as linhas de  $\text{H I}$  também segue este padrão, com exceção da IRAS05414+5840 que esta bem deslocada para o limite direito do diagrama. Este comportamento pode ser explicado pelo fato dessa galáxia possuir uma grande concentração de poeira localizado entre o observador e o bojo da galáxia (ver Figura 1.9).

O resultado do avermelhamento para ambas razões de linhas estão listados na Tabela 3.6. As razões de linhas do  $\text{H I}$  encontram-se na segunda coluna e as de  $[\text{Fe II}]$  na terceira coluna desta tabela. É possível notar na Tabela 3.6 e na Figura 3.9 que existe pouca diferença nas razões de linhas de  $\text{H I}$  para as galáxias classificadas como galáxias compostas (IRAS03056+2034 e IRAS04332+0209), porém, para as razões calculadas usando as linhas de  $[\text{Fe II}]$  os valores aumentaram ( $\sim 0,3$ ) significativamente.

Podemos perceber que a razão das linhas de  $\text{H I}$  é maior que a razão das linhas de  $[\text{Fe II}]$

Tabela 3.6 - Vermelhação derivado para amostra de OHMGs.

Galáxias	$\text{Pa}\beta / \text{Br}\gamma$	$[\text{Fe II}]1,2\mu\text{m}/[\text{Fe II}]1,6\mu\text{m}$
IRAS01364-1042	—	—
IRAS03056+2034	0.30	1,08
IRAS04332+0209	0.34	0,84
IRAS05414+5840	1.34	0,79
IRAS17526+3253	—	—
IRAS19154+2704	—	—
IRAS23135+2516	0.24	—
IRASF23199+0123	—	—
Mrk926	—	—

para a galáxias IRAS05414+5840 (ver 3.6 e na Figura 3.9). Atribuímos esse comportamento ao fato da razão das linhas de H I estar sendo mais afetada pela lâmina de poeira presente no bojo da IRAS05414+5840 que a razão das linhas de [Fe II].

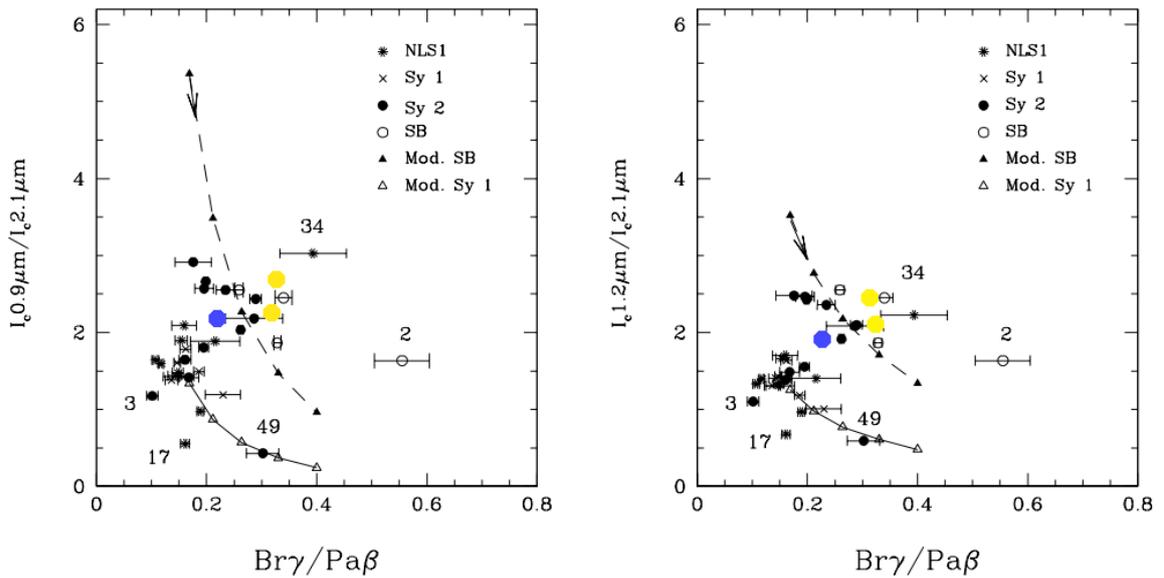


Figura 3.10: Diagrama envolvendo os indicadores de avermelhamento das linhas de H I. As bolas amarelas representam as OHMGs da classe Starburst da nossa amostra. A bola em azul representa a OHMGs Seyfert 2 da nossa amostra.

É mostrado na Figura 3.10 o diagrama  $\text{Br}\gamma/\text{Pa}\beta$  versus intensidades do contínuo em  $0,9\mu\text{m}$  por  $2,1\mu\text{m}$  ( $I_c 0,9\mu\text{m}/I_c 2,1\mu\text{m}$ ) e  $1,2\mu\text{m}$  por  $2,1\mu\text{m}$  ( $I_c 1,2\mu\text{m}/I_c 2,1\mu\text{m}$ ) retirados de Riffel et al. (2006), onde esses autores utilizam esses diagramas para detectar galáxias

com alta taxa de formação estelar. Os valores de intensidades do contínuo em  $0,9\mu\text{m}$  foi derivado através da integração entre os intervalos  $2,09\mu\text{m}$  e  $2,10\mu\text{m}$ , enquanto que o fluxo do contínuo em  $2,1\mu\text{m}$  foi derivado entre  $1,22\mu\text{m}$  e  $1,23\mu\text{m}$ .

Na Figura 3.10 os triângulos preenchidos unidos por uma linha tracejada representam um modelo de vermelhação de galáxias Starburst com limite superior de  $E(B-V)=0$  mag e limite inferior de  $E(B-V)=2$  mag. Os triângulos abertos conectados por uma linha sólida representam um modelo de vermelhação para galáxias Seyfert 1, com limites superior e inferior também iguais a  $E(B-V)=0$  mag e  $E(B-V)=2$  mag, respectivamente. Note que os pontos amarelos (galáxias Starburst da nossa amostra) estão próximas ao modelo de vermelhação de galáxias Starburst derivados para a amostra de Starburst de Riffel et al. (2006). O ponto em azul na Figura 3.10 representa a galáxia IRAS23135+2516 que foi classificada como galáxia Seyfert 2 (ver Tabela 3.5).

A partir da Figura 3.10 podemos concluir que a galáxia IRAS23135+2516, apesar de ser uma Seyfert 2, possui uma taxa relativamente alta de formação estelar, porém menor as galáxias Starburst da amostra Riffel et al. (2006). Entretanto, para compreender melhor a formação estelar da OHMG IRAS23135+2516 é necessário um estudo mais cuidadoso da população estelar.

Por outro lado, as galáxias IRAS03056+2034 e IRAS04332+0209 (pontos amarelos na Figura 3.10) estão em uma região de concentração de galáxias Starburst da amostra de Riffel et al. (2006). Isso pode mostrar que OHMGs da nossa amostra que hospedam núcleo composto tem vermelhações semelhantes as galáxias Starburst da amostra de Riffel et al. (2006), sugerindo que essas classes de galáxias, Starburst e OHMG+Starburst, possuem alta taxa de população estelar. Entretanto, derivação mais robusta da população estelar na amostra de galáxias OHMGs são necessárias.



## Conclusões

O intervalo espectral do NIR cobre uma quantidade importante de indicadores que podem ser usados para diagnosticar tanto a excitação da poeira quente ( $\sim 1500\text{K}$ ) e gás ionizado quanto o Hidrogênio molecular (Rodríguez-Ardila et al., 2011; Riffel et al., 2006; Rodríguez-Ardila e Mazzalay, 2006; Marinello et al., 2016). Trabalhos recentes mostraram que linhas proibidas com alto potencial de ionização (125-450 eV), também conhecidas como linhas coronais (e.g. [S VIII], [Fe X III], [S IX] e [Si X]) são assinaturas claras de atividade de AGNs, sendo detectadas em 67% de AGNs, entretanto elas são completamente ausentes em galáxias starburst (Rodríguez-Ardila et al., 2011; Riffel et al., 2006).

Entretanto, nenhum estudo espectroscópico no NIR de OHMGs foi explorado até a presente data. Portanto, neste trabalho derivamos, pela primeira vez, as propriedades físicas de galáxias OHMGs nesta faixa espectral no intuito de mapear as linhas emitidas por esta amostra e classificá-las de acordo com sua atividade nuclear.

Com isso foi possível observar que nesta amostra as linhas de recombinação do Hidrogênio,  $\text{Pa}\beta$  em  $1,2\mu\text{m}$  e  $\text{Pa}\alpha$  em  $1,87\mu\text{m}$ , aparecem em grande parte dos espectros da nossa amostra sendo que a linha  $\text{Pa}\beta$  apresenta uma frequência de 55% e a linha  $\text{Pa}\alpha$  em  $1,87\mu\text{m}$  em 44% das galáxias, respectivamente.

Por outro lado, a linha de Hidrogênio molecular  $\text{H}_2$  em  $2,21\mu\text{m}$  esta presente em 88% das galáxias da amostra (ver o pico máximo da Figura 3.4). Linhas de He I que aparece em 55% das galáxias da amostra. Linhas com alto potencial de ionização como o [Fe II] estão presentes em 55% da nossa amostra. A emissão de [Si X] em  $1,43\mu\text{m}$  e [Si IV] em  $1,96\mu\text{m}$  e a linha de Mg II em  $2,13\mu\text{m}$  foram identificadas apenas em duas fontes da amostra, nas galáxias IRAS19154+2704 e IRAS17526+3253, respectivamente.

A presença de linhas largas foi observadas na OHMGs IRAS19154+2704 e Mrk926, am-

bas nas linhas de Pa $\gamma$  em 1,09  $\mu\text{m}$  e Pa $\alpha$  em 1,87  $\mu\text{m}$ . Na galáxia IRAS19154+2704 essas linhas possuem FWHM de  $\sim 1946 \text{ km s}^{-1}$  e  $\sim 2595 \text{ km s}^{-1}$ , respectivamente. Na galáxia Mrk926 essas linhas alcançam valores de FWHM de  $\sim 3376 \text{ km s}^{-1}$  para componente avermelhada do Pa $\gamma$  e  $\sim 3360 \text{ km s}^{-1}$  para a componente azulada de Pa $\gamma$ . A componente azulada de Pa $\alpha$  da Mrk926 tem FWHM de  $\sim 4169 \text{ km s}^{-1}$  enquanto a componente avermelhada alcançou valores de  $\sim 4089 \text{ km s}^{-1}$ .

A classificação das fontes de ionização da amostra de OHMGs observadas com o SpeX/IRTF e LIRIS/WHT foram resumidas na tabela 3.5. Na terceira coluna desta tabela descrevemos qual foi o método utilizado para nossa classificação. A classificação se deu através de dois métodos distintos a fim de derivar a fonte ionizante do maior número de galáxia da nossa amostra.

O primeiro método se baseou na presença das linhas com alto potencial de ionização e na cinemática das linhas de recombinação do Hidrogênio e o segundo método foi baseado nos diagramas de diagnostico das razões de linhas H $_2$ /Br $\gamma$  versus [FeII]/Br $\gamma$  e H $_2$ /Br $\gamma$  versus [FeII]/Pa $\beta$  sugerido por Colina et al. (2015) e Rodríguez-Ardila et al. (2011); Rodríguez-Ardila e Mazzalay (2006); Riffel et al. (2006), respectivamente (ver Figuras 3.6 e 3.7). A partir do diagrama proposto por Rodríguez-Ardila et al. (2011) e Riffel et al. (2006) e uma adaptação feita por Colina et al. (2015) podemos concluir que:

(1) As galáxias IRAS01364–1042 e IRAS04332 + 0209 são dominadas por ionização de fonte OHMG+Starburst;

(2) As galáxias IRAS03056 + 2034, IRAS05414 + 5840, IRAS19154 + 2704 e IRAS23135 + 2516 são galáxias OHMGs que hospedam AGNs (ver Figura 3.6 e 3.7).

As OHMGs IRAS03056+2034 e IRAS04332+0209 estavam na região de AGNs no diagrama H $_2$ /Br $\gamma$  versus [FeII]1,6 $\mu\text{m}$ /Br $\gamma$  e deslocaram para a região de Starburst no diagrama H $_2$ /Br $\gamma$  versus [FeII]1,2 $\mu\text{m}$ /Pa $\beta$  (Ver 3.7. Este fato pode ser um indicador da coexistência de atividades Starburst e AGNs nessas galáxias. Esse resultado corrobora com os derivados por Hekatelyne et al. (2018), onde os autores encontraram através de dados no óptico observados com GMOS/IFU do telescópio Gemini a presença de ambas atividades Starburst e AGN na OHMGs IRAS03056+2034.

Em ambos diagramas (ver Figura 3.6 e 3.7) a IRAS05414+5840 apresentou a classificação de AGN em ambos diagrama de diagnóstico corroborando com os resultados de Véron-Cetty, M.-P. e Véron, P. (2006).

Através dos perfis de linhas confirmamos a classificação das OHMGs IRAS05414+5840, IRAS19154+2704 e IRAS23135+2516.

A Figura 3.8 mostra um histograma da frequência com a classificação das fontes de ionização do gás e da poeira na amostra de 9 OHMGs estudadas neste trabalho. Quantificamos que  $\sim 56\%$  da nossa amostra é composta por galáxias Seyferts,  $22\%$  de galáxias Starburst e  $22\%$  de fonte de ionização composta por Starburs e AGNs. Esta frequência derivada utilizou resultados prévios com dados de campo integral no óptico GMOS/IFU do telescópio Gemini realizado por co-autores neste estudo Hekatelyne et al. (2018) e Sales et al. (2019).

Por fim, foi possível uma análise do avermelhamento da amostra através de um método proposto por Rodriguez-Ardila et al. (2004) o qual utiliza linhas de emissão proibida do ferro ( $[\text{Fe II}] 1,25 \mu\text{m} / 1,64 \mu\text{m}$ ) (Ver Figura 3.9).

Com o auxílio da Figura 3.9 podemos notar que as OHMGs da nossa amostra tendem a se aproximar do limite inferior ( $E(B-V) = 2 \text{ mag}$ ) da razão das linhas de  $[\text{Fe II}]$  em comparação com as galáxias da amostra de Riffel et al. (2006). A razão calculada com as linhas de H I também seguem este padrão, com exceção da IRAS05414+5840 que esta bem deslocada para o limite direito do diagrama.

O resultado do avermelhamento para ambas razões de linhas estão listados na Tabela 3.6 e é possível notar que existe pouca diferença nas razões de linhas de H I para as galáxias classificadas como Starburst (IRAS03056+2034 e IRAS04332+0209), porém, para as razões calculadas usando as linhas de  $[\text{Fe II}]$  os valores aumentaram ( $\sim 0,3$ ) significativamente.

É mostrado na Figura 3.10 o diagrama  $\text{Br}\gamma/\text{Pa}\beta$  versus intensidades do contínuo em  $0,9 \mu\text{m}$  por  $2,1 \mu\text{m}$  ( $I_c 0,9 \mu\text{m}/I_c 2,1 \mu\text{m}$ ) e  $1,2 \mu\text{m}$  por  $2,1 \mu\text{m}$  ( $I_c 1,2 \mu\text{m}/I_c 2,1 \mu\text{m}$ ) retirados de Riffel et al. (2006), onde esses autores utilizam esses diagramas para detectar galáxias com alta taxa de formação estelar.

A partir da Figura 3.10 podemos concluir que a galáxia IRAS23135+2516, apesar de ser uma Seyfert 2, possui uma taxa relativamente alta de formação estelar, porém menor as galáxias Starburst da amostra Riffel et al. (2006). Entretanto, para compreender melhor a formação estelar da OHMG IRAS23135+2516 é necessário um estudo mais cuidadoso da

população estelar.

Por outro lado, as galáxias IRAS03056+2034 e IRAS04332+0209 (pontos amarelos na Figura 3.10) estão em uma região de concentração de galáxias Starburst da amostra de Riffel et al. (2006). Isso pode mostrar que OHMGs da nossa amostra que hospedam núcleo OHMG+Starburst tem avermelhamentos semelhantes as galáxias Starburst da amostra de Riffel et al. (2006), sugerindo que essas classes de galáxias, Starburst e OHMG+Starburst, possuem alta taxa de população estelar. Entretanto, derivação mais robusta da população estelar na amostra de galáxias OHMGs são necessárias.

A fim de compreender melhor a estrutura e composição das OHMGs da amostra temos como próximo passo deste estudo e obter uma derivação mais robusta da cinemática estelar e da população estelar da amostra. Bem como, observar com um telescópio de 8 metros as 40 OHMGs pertencentes a amostra de Darling e Giovanelli (2002); Baan e Klöckner (2006).

## Referências Bibliográficas

- Antonucci R., Unified models for active galactic nuclei and quasars, *ARA&A*, 1993, vol. 31, p. 473
- Antonucci R., Kinney A. L., Hurt T., Hubble Space Telescope ultraviolet spectroscopy of the highly polarized but quiescent quasar OI 287, *ApJ*, 1993, vol. 414, p. 506
- Antonucci R. R. J., Miller J. S., Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068, *ApJ*, 1985, vol. 297, p. 621
- Arp H., Atlas of Peculiar Galaxies, *ApJS*, 1966, vol. 14, p. 1
- Baan W. A., Haschick A., H I absorption and OH emission in IC 694/NGC 3690, *ApJ*, 1990, vol. 364, p. 65
- Baan W. A., Haschick A. D., Schmelz J. T., The fourth OH megamaser - Markarian 273, *ApJ*, 1985a, vol. 298, p. L51
- Baan W. A., Haschick A. D., Schmelz J. T., The fourth OH megamaser - Markarian 273, *ApJ*, 1985b, vol. 298, p. L51
- Baan W. A., Klöckner H. R., Radio properties of FIR-megamaser nuclei, *A&A*, 2006, vol. 449, p. 559
- Baan W. A., Salzer J. J., LeWinter R. D., Optical Classification of Megamaser Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 1998, vol. 509, p. 633
- Baan W. A., Wood P. A. D., Haschick A. D., Broad hydroxyl emission in IC 4553, *ApJ*, 1982, vol. 260, p. L49

- Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S., The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction, *ApJ*, 1989, vol. 345, p. 245
- Cheung A. C., Rank D. M., Townes C. H., Thornton D. D., Welch W. J., Detection of NH<sub>3</sub> Molecules in the Interstellar Medium by Their Microwave Emission, *Physical Review Letters*, 1968, vol. 21, p. 1701
- Cheung A. C., Rank D. M., Townes C. H., Thornton D. D., Welch W. J., Detection of Water in Interstellar Regions by its Microwave Radiation, *Nature*, 1969, vol. 221, p. 626
- Churchwell E., Witzel A., Huchtmeier W., Pauliny-Toth I., Roland J., Sieber W., Detection of H<sub>2</sub>O maser emission in the Galaxy M 33, *A&A*, 1977, vol. 54, p. 969
- Cid Fernandes R., T.M. H., Schmitt H., Gonzalez-Delgado R., Storchi-Bergmann T., Empirical Diagnostics of the Starburst-AGN Connection, *The Astrophysical Journal*, 2001, vol. 558
- Claussen M. J., Heiligman G. M., Lo K. Y., Water-vapor maser emission from galactic nuclei, *Nature*, 1984, vol. 310, p. 298
- Claussen M. J., Lo K.-Y., Circumnuclear water vapor masers in active galaxies, *ApJ*, 1986, vol. 308, p. 592
- Colina L., Piqueras López J., Arribas S., Riffel R., Riffel R. A., Rodriguez-Ardila A., Pastoriza M., Storchi-Bergmann T., Alonso-Herrero A., Sales D., Understanding the two-dimensional ionization structure in luminous infrared galaxies. A near-IR integral field spectroscopy perspective, *A&A*, 2015, vol. 578, p. A48
- Conroy C., Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies, *ARA&A*, 2013, vol. 51, p. 393
- Cushing M. C., Vacca W. D., Rayner J. T., Spextool: A Spectral Extraction Package for SpeX, a 0.8-5.5 Micron Cross-Dispersed Spectrograph, *PASP*, 2004, vol. 116, p. 362
- Darling J., Giovanelli R., A Search for OH Megamasers at  $Z \approx 0.1$ . I. Preliminary Results, *AJ*, 2000, vol. 119, p. 3003
- Darling J., Giovanelli R., A Search for OH Megamasers at  $Z \approx 0.1$ . II. Further Results, *AJ*, 2001, vol. 121, p. 1278

- Darling J., Giovanelli R., A Search for OH Megamasers at  $z \approx 0.1$ . III. The Complete Survey, *AJ*, 2002, vol. 124, p. 100
- Darling J., Giovanelli R., Optical Spectral Classification of Major Mergers: OH Megamaser Hosts versus Nonmasing (Ultra)Luminous Infrared Galaxies, *AJ*, 2006, vol. 132, p. 2596
- Davidson K., Netzer H., The emission lines of quasars and similar objects, *Reviews of Modern Physics*, 1979, vol. 51, p. 715
- Dos Santos P. M., Lepine J. R. D., Detection of strong H<sub>2</sub>O emission from galaxy NGC4945, vol. 278, 1979, p. 34
- Draine B., *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*. Princeton Series in Astrophysics, Princeton University Press, 2010
- Dyson J. E., Perry J. J., Shock formation of the broad emission-line regions in QSOs and active galactic nuclei, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1985, vol. 213, p. 665
- Gallais P., Charmandaris V., Le Floch E., Mirabel I. F., Sauvage M., Vigroux L., Laurent O., Dust enshrouded star-forming activity in Arp 299, *A&A*, 2004, vol. 414, p. 845
- Gardner F. F., Whiteoak J. B., The Circinus galaxy - A second case of intense nuclear H<sub>2</sub>O emission, *MNRAS*, 1982, vol. 201, p. 13P
- Gastão, 2018 *Astronomia Extragaláctica: Notas de Aula*
- Gordon J. P., Zeiger H. J., Townes C. H., The Maser—New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer, *Phys. Rev.*, 1955, vol. 99, p. 1264
- Hekatelyne C., Riffel R. A., Sales D., Robinson A., Gallimore J., Storchi-Bergmann T., Kharb P., O’Dea C., Baum S., Gemini IFU, VLA, and HST observations of the OH megamaser galaxy IRAS F23199+0123: the hidden monster and its outflow, *MNRAS*, 2018, vol. 474, p. 5319
- Hekatelyne C., Riffel R. A., Sales D., Robinson A., Storchi-Bergmann T., Kharb P., Gallimore J., Baum S., O’Dea C., Star formation and gas inflows in the OH megamaser galaxy IRAS03056+2034, *MNRAS*, 2018, vol. 479, p. 3966

- Herschel W. L. D., Catalogue of One Thousand New Nebulae and Clusters of Stars, Royal Society of London Philophical Transactions Seies I, 1786, vol. 76, p. 457
- Houck J. R., Schneider D. P., Danielson G. E., Beichman C. A., Lonsdale C. J., Neugebauer G., Soifer B. T., Unidentified IRAS sources - Ultrahigh-luminosity galaxies, *ApJ*, 1985, vol. 290, p. L5
- Huchtmeier W. K., Witzel A., Kuehr H., Pauliny-Toth I. I., Roland J., Further detections of H<sub>2</sub>O emission from external galaxies., *A&A*, 1978, vol. 64, p. L21
- Kapteyn J. C., On the Absorption of Light in Space, *ApJ*, 1909, vol. 29, p. 46
- Kewley L. J., Groves B., Kauffmann G., Heckman T., The host galaxies and classification of active galactic nuclei, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, vol. 372, p. 961
- KUTNER M. L., *Astronomy: a Physical Perspective*. Cambridge University Press, 2003
- Larkin J. E., Armus L., Knop R. A., Soifer B. T., Matthews K., A Near-Infrared Spectroscopic Survey of LINER Galaxies, *ApJS*, 1998, vol. 114, p. 59
- Licquia T. C., Newman J. A., Improved Estimates of the Milky Way's Stellar Mass and Star Formation Rate from Hierarchical Bayesian Meta-Analysis, *ApJ*, 2015, vol. 806, p. 96
- Lo K. Y., Mega-Masers and Galaxies, *ARA&A*, 2005, vol. 43, p. 625
- Maciel W., *Astrofísica do Meio Interestelar Vol. 41*. EDUSP, 2002
- Marinello A. O. M., Rodriguez-Ardila A., Garcia-Rissmann A., Sigut T. A. A., Pradhan A. K., The FeII emission in active galactic nuclei: excitation mechanisms and location of the emitting region, *arXiv e-prints*, 2016, p. arXiv:1602.05159
- Mason B. D., Wycoff G. L., Hartkopf W. I., Douglass G. G., Worley C. E., *VizieR Online Data Catalog: The Washington Visual Double Star Catalog (Mason+ 2001-2013)*, *VizieR Online Data Catalog*, 2013, p. B/wds
- Matthews T. A., Sandage A. R., Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects., *ApJ*, 1963, vol. 138, p. 30

- Merloni A., Heinz S., *Evolution of Active Galactic Nuclei*, 2012
- Morgan W. W., *Preliminary Classification of the Forms of Galaxies According to Their Stellar Population. II*, PASP, 1959, vol. 71, p. 394
- Mould J. R., *Stellar populations in the Galaxy*, ARA&A, 1982, vol. 20, p. 91
- Osmer P. S., Smith M. G., Weedman D. W., *The nuclei of peculiar emission-line galaxies.*, ApJ, 1974, vol. 192, p. 279
- Osterbrock D., *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*. California: University Science Books, 1989
- Padovani P., Alexander D. M., Assef R. J., De Marco B., Giommi P., Hickox R. C., Richards G. T., Smolčić V., Hatziminaoglou E., Mainieri V., Salvato M., *Active galactic nuclei: what's in a name?*, Astronomy and Astrophysics Review, 2017, vol. 25, p. 2
- Pastoriza M. G., *Spectra of peculiar nuclei in galaxies*, The Observatory, 1967, vol. 87, p. 225
- Pastoriza M. G., *Studies of galaxies with peculiar nuclei*, Ap&SS, 1975, vol. 33, p. 173
- Peterson B. M., *An Introduction to Active Galactic Nuclei*, 1997
- Pradhan A., Nahar S., *Atomic Astrophysics and Spectroscopy*. Cambridge University Press, 2015
- Riffel R., *Galáxias de núcleo ativo: caracterização do contínuo e das linhas de emissão no infravermelho próximo*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008, Tese de Doutorado, 130 p.
- Riffel R., Pastoriza M. G., Rodríguez-Ardila A., *The physical properties and excitation mechanisms of H[2] and [Fe II] emission in AGN*. In *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, vol. 26 of *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, vol. 27, 2006, p. 206
- Riffel R., Pastoriza M. G., Rodríguez-Ardila A., Maraston C., *The stellar populations of starburst galaxies through near-infrared spectroscopy*, MNRAS, 2008, vol. 388, p. 803

- Riffel R., Rodríguez-Ardila A., Aleman I., Brotherton M. S., Pastoriza M. G., Bonatto C., Dors O. L., Erratum: Molecular hydrogen and [Fe II] in active galactic nuclei III: LINERS and star forming galaxies, *MNRAS*, 2013, vol. 432, p. 3545
- Riffel, R. Rodríguez-Ardila, A. Pastoriza, M. G. A 0.8-2.4 ectral atlas of active galactic nuclei, *A&A*, 2006, vol. 457, p. 61
- Rigopoulou D., Spoon H. W. W., Genzel R., Lutz D., Moorwood A. F. M., Tran Q. D., A Large Mid-Infrared Spectroscopic and Near-Infrared Imaging Survey of Ultraluminous Infrared Galaxies: Their Nature and Evolution, *The Astronomical Journal*, 1999, vol. 118, p. 2625
- Rodríguez-Ardila A., Pastoriza M. G., Viegas S., Sigut T. A. A., Pradhan A. K., Molecular hydrogen and [Fe II] in Active Galactic Nuclei, *A&A*, 2004, vol. 425, p. 457
- Rodríguez-Ardila A., Prieto M. A., Portilla J. G., Tejeiro J. M., The Near-infrared Coronal Line Spectrum of 54 nearby Active Galactic Nuclei, *ApJ*, 2011, vol. 743, p. 100
- Rodríguez-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*, 2006, vol. 367, p. L57
- Sales D. A., Robinson A., Axon D. J., Gallimore J., Kharb P., Curran R. L., O'Dea C., Baum S., Elitzur M., Mittal R., An Embedded Active Nucleus in the OH Megamaser Galaxy IRAS16399-0937, *ApJ*, 2015, vol. 799, p. 25
- Sales D. A., Robinson A., Riffel R. A., Storchi-Bergmann T., Gallimore J. F., Kharb P., Baum S., O'Dea C., Hekatelyne C., Ferrari F., Gemini IFU, VLA, and HST observations of the OH Megamaser Galaxy IRAS17526 + 3253, *MNRAS*, 2019, vol. 486, p. 3350
- Sales D. A. d., Propriedades físicas dos silicatos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos presentes na região nuclear das galáxias Seyferts e Starburst, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012, Tese de Doutorado, 166 p.
- Sanders D. B., Soifer B. T., Elias J. H., Madore B. F., Matthews K., Neugebauer G., Scoville N. Z., Ultraluminous infrared galaxies and the origin of quasars, *ApJ*, 1988a, vol. 325, p. 74

- Sanders D. B., Soifer B. T., Elias J. H., Madore B. F., Matthews K., Neugebauer G., Scoville N. Z., Ultraluminous infrared galaxies and the origin of quasars, *ApJ*, 1988b, vol. 325, p. 74
- Schmidt M., 3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift, *Nature*, 1963, vol. 197, p. 1040
- Scoville N., Norman C., The Evolution of Starburst Galaxies to Active Galactic Nuclei. In *Active Galactic Nuclei* , vol. 134 of IAU Symposium, 1989, p. 65
- Searle L., Sargent W. L. W., Bagnuolo W. G., The History of Star Formation and the Colors of Late-Type Galaxies, *ApJ*, 1973, vol. 179, p. 427
- Sérsic J. L., Pastoriza M., Peculiar Nuclei of Galaxies, *PASP*, 1965, vol. 77, p. 287
- Seyfert C. K., Nuclear Emission in Spiral Nebulae., *ApJ*, 1943, vol. 97, p. 28
- Shakura N. I., Sunyaev R. A., Black Holes in Binary Systems: Observational Appearances. In *X- and Gamma-Ray Astronomy* , vol. 55 of IAU Symposium, 1973, p. 155
- Soifer B. T., Neugebauer G., The properties of infrared galaxies in the local universe, *AJ*, 1991, vol. 101, p. 354
- Soifer B. T., Neugebauer G., Houck J. R., The IRAS view of the extragalactic sky, *ARA&A*, 1987, vol. 25, p. 187
- Struve F. G. W., *Etudes d'Astronomie Stellaire: Sur la voie lactee et sur la distance des etoiles fixes*, 1847
- Trumpler R. J., Absorption of Light in the Galactic System, *PASP*, 1930, vol. 42, p. 214
- Ulrich M.-H., Maraschi L., Urry C., Variability of active galactic nuclei, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2003, vol. 35, p. 445
- Vader J. P., Da Costa G. S., Frogel J. A., Heisler C. A., Simon M., The host galaxy of quasar IRAS 00275-2859 - an interacting system, *AJ*, 1987, vol. 94, p. 847
- Véron-Cetty, M.-P. Véron, P. A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition, *A&A*, 2006, vol. 455, p. 773

- Vignali C., Brandt W. N., Comastri A., Darling J., On the X-ray properties of OH megamaser sources: Chandra snapshot observations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, vol. 364, p. 99
- Weaver H., Williams D. R. W., Dieter N. H., Lum W. T., Observations of a Strong Unidentified Microwave Line and of Emission from the OH Molecule, *Nature*, 1965, vol. 208, p. 29
- Weedman D. W., Starburst Galaxies as X-ray Radio, and Supernova Sources. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 13 of BAAS, 1981, p. 525
- Weinreb S., Barrett A. H., Meeks M. L., Henry J. C., Radio Observations of OH in the Interstellar Medium, *Nature*, 1963, vol. 200, p. 829
- Willett K. W., Darling J., Spoon H. W. W., Charmandaris V., Armus L., MID-INFRARED PROPERTIES OF OH MEGAMASER HOST GALAXIES. I. SPITZER IRS LOW- AND HIGH-RESOLUTION SPECTROSCOPY, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, vol. 193, p. 18
- Wilson C. D., Harris W. E., Longden R., Scoville N. Z., Two Populations of Young Massive Star Clusters in Arp 220, *ApJ*, 2006, vol. 641, p. 763
- Xiang D., Turner B. E., Newly Discovered Galactic H<sub>2</sub>O Masers Associated with Outflows, *ApJS*, 1995, vol. 99, p. 121
- Yankulova I. M., Golev V. K., Jockers K., The luminous infrared composite Seyfert 2 galaxy jASTROBJ NGC 7679j/ASTROBJ through the [O III]  $\lambda$  5007 emission line, *A&A*, 2007, vol. 469, p. 891
- Zuckerman B., Buhl D., Palmer P., Snyder L. E., Observations of Interstellar Formaldehyde, *ApJ*, 1970, vol. 160, p. 485

# Apêndice



Apêndice A 

---

Ajustes dos Perfis de Linhas de Emissão da Amostra

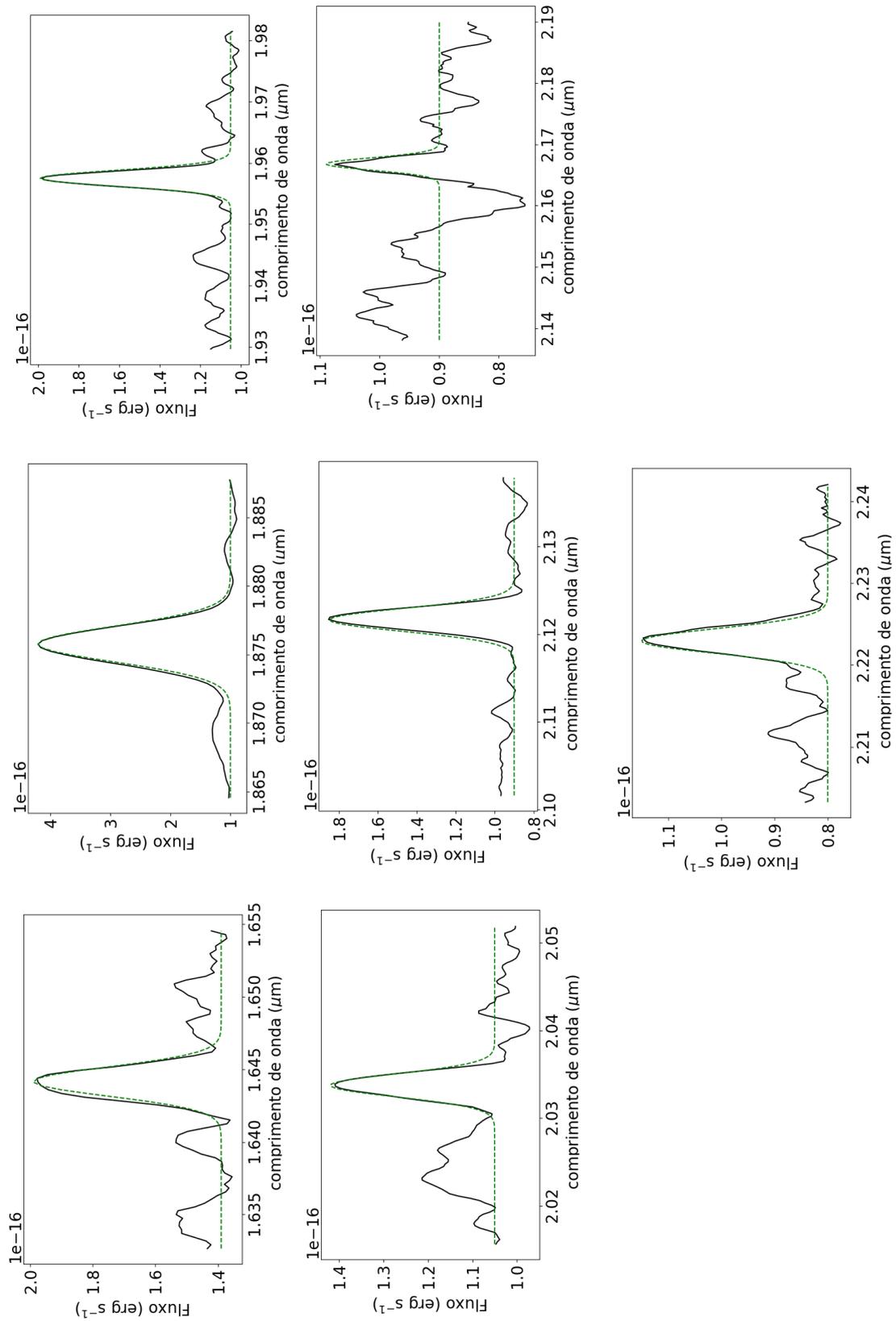


Figura A.1: Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS01364-1042. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4

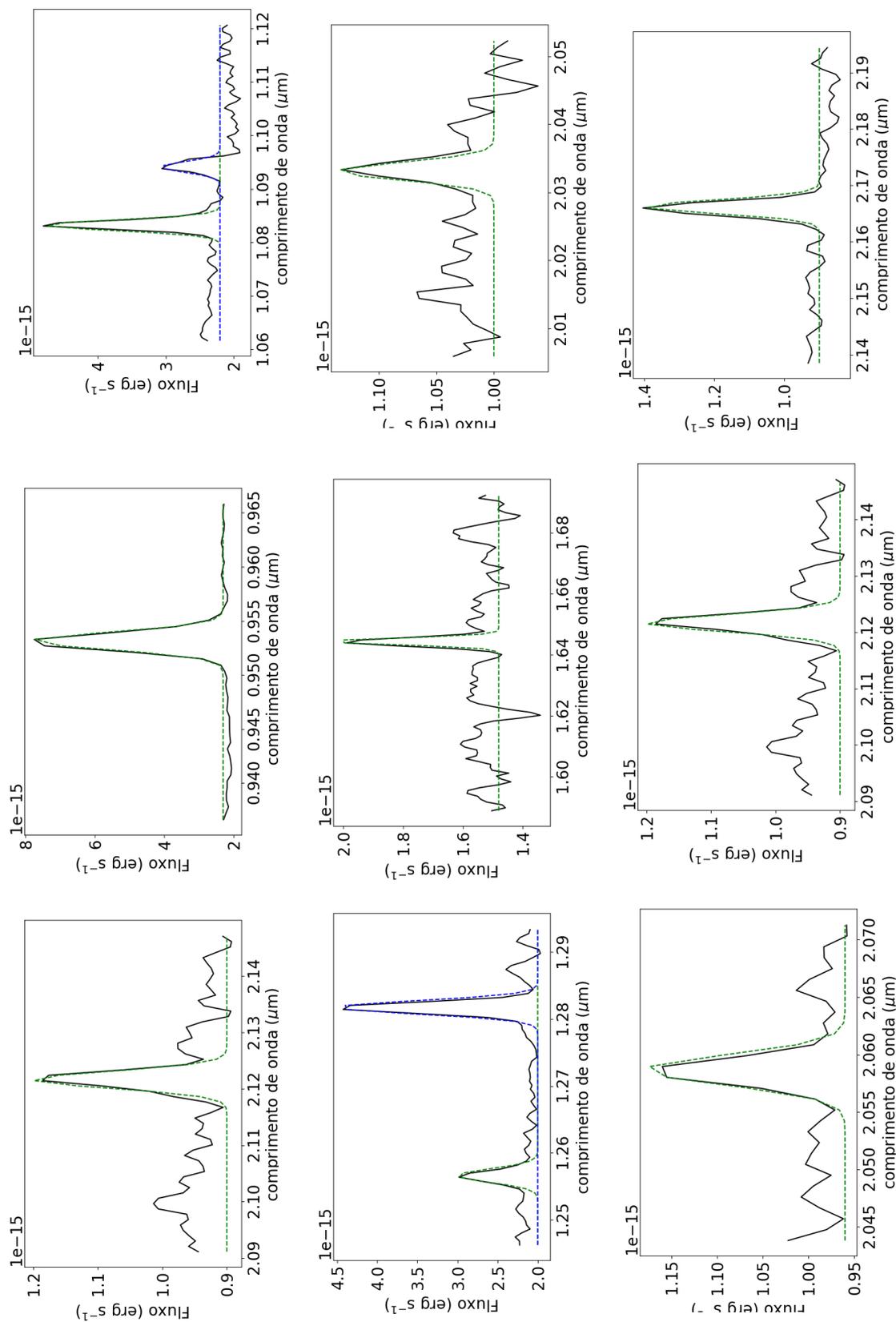


Figura A.2: Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS03056+2034. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4

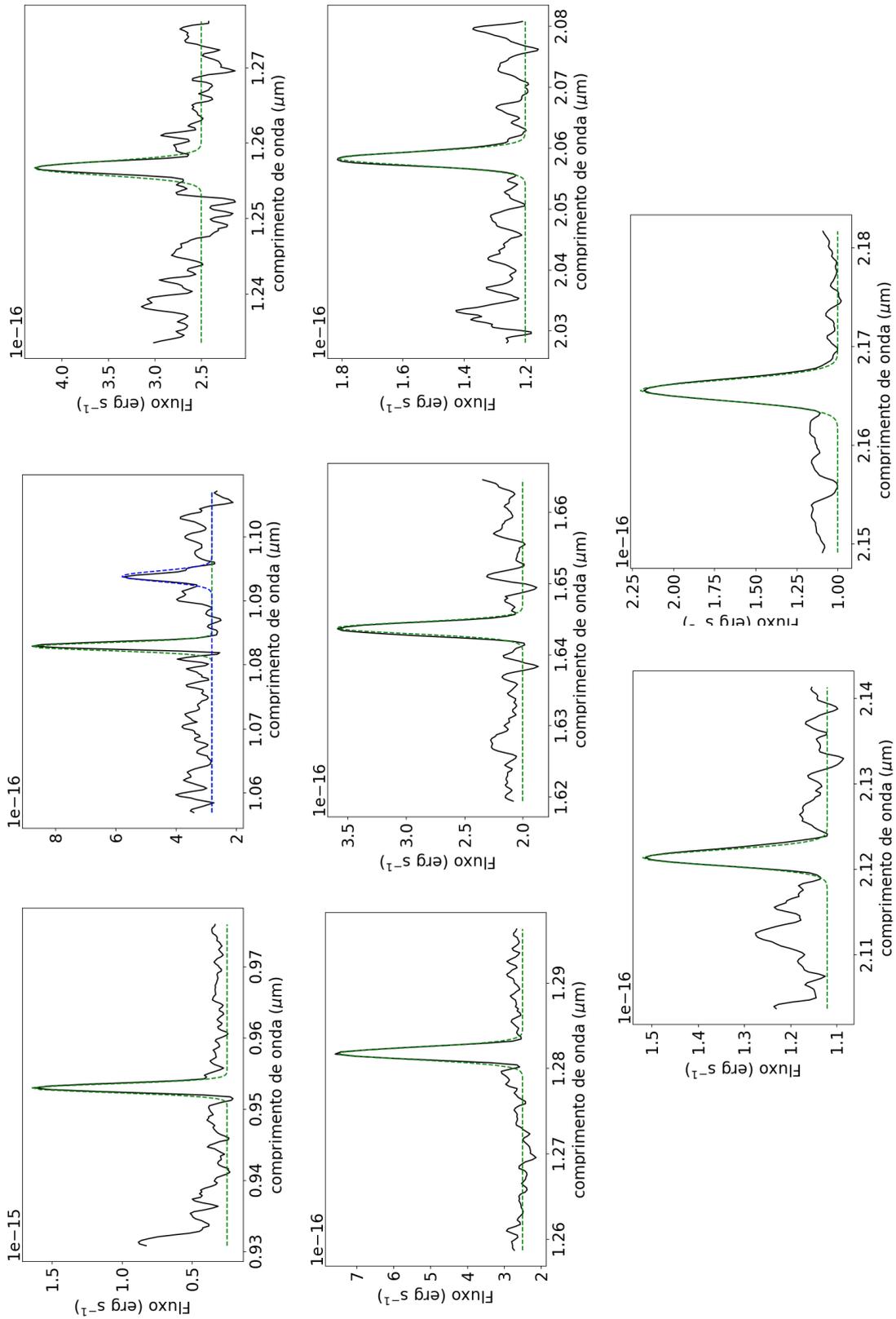


Figura A.3: Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS04332+0209. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4

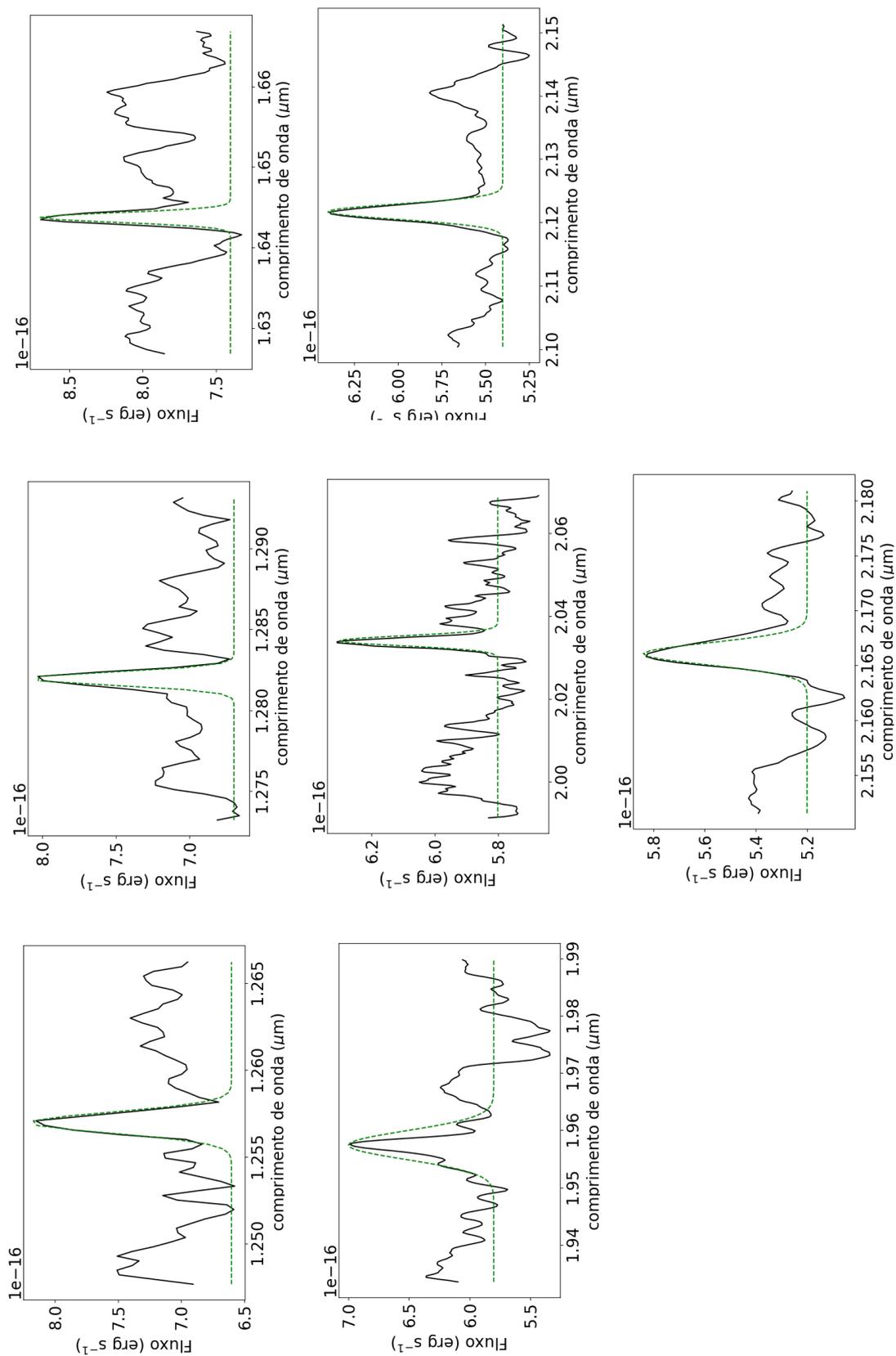


Figura A.4: Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS05414+5840. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

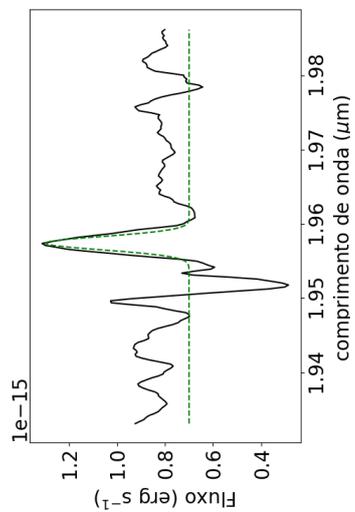
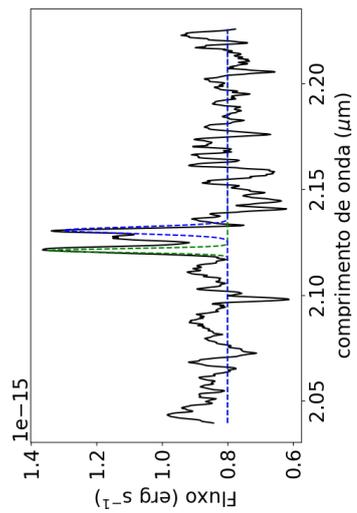


Figura A.5: Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS17526+3253. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

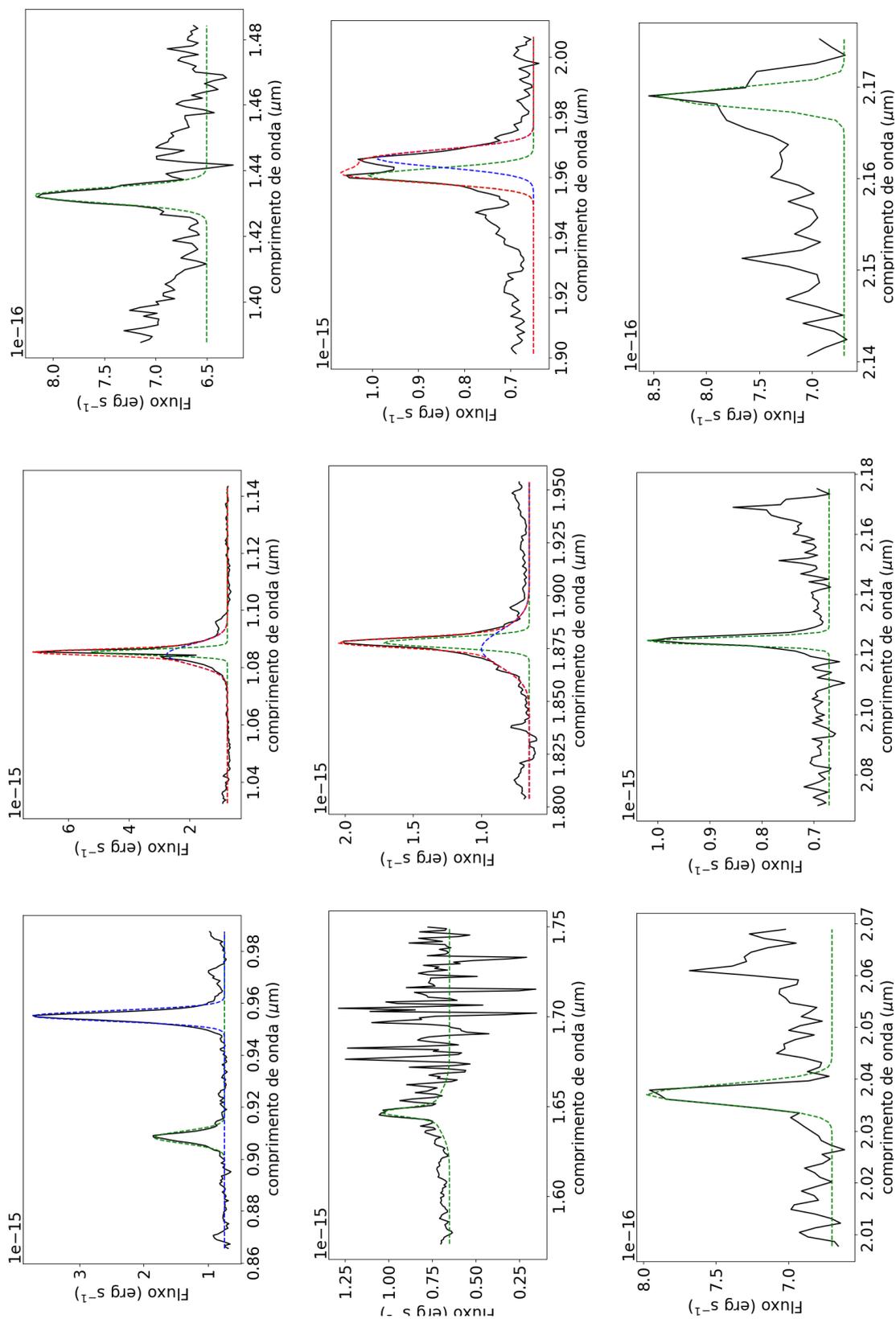


Figura A.6: Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS19154+2704. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

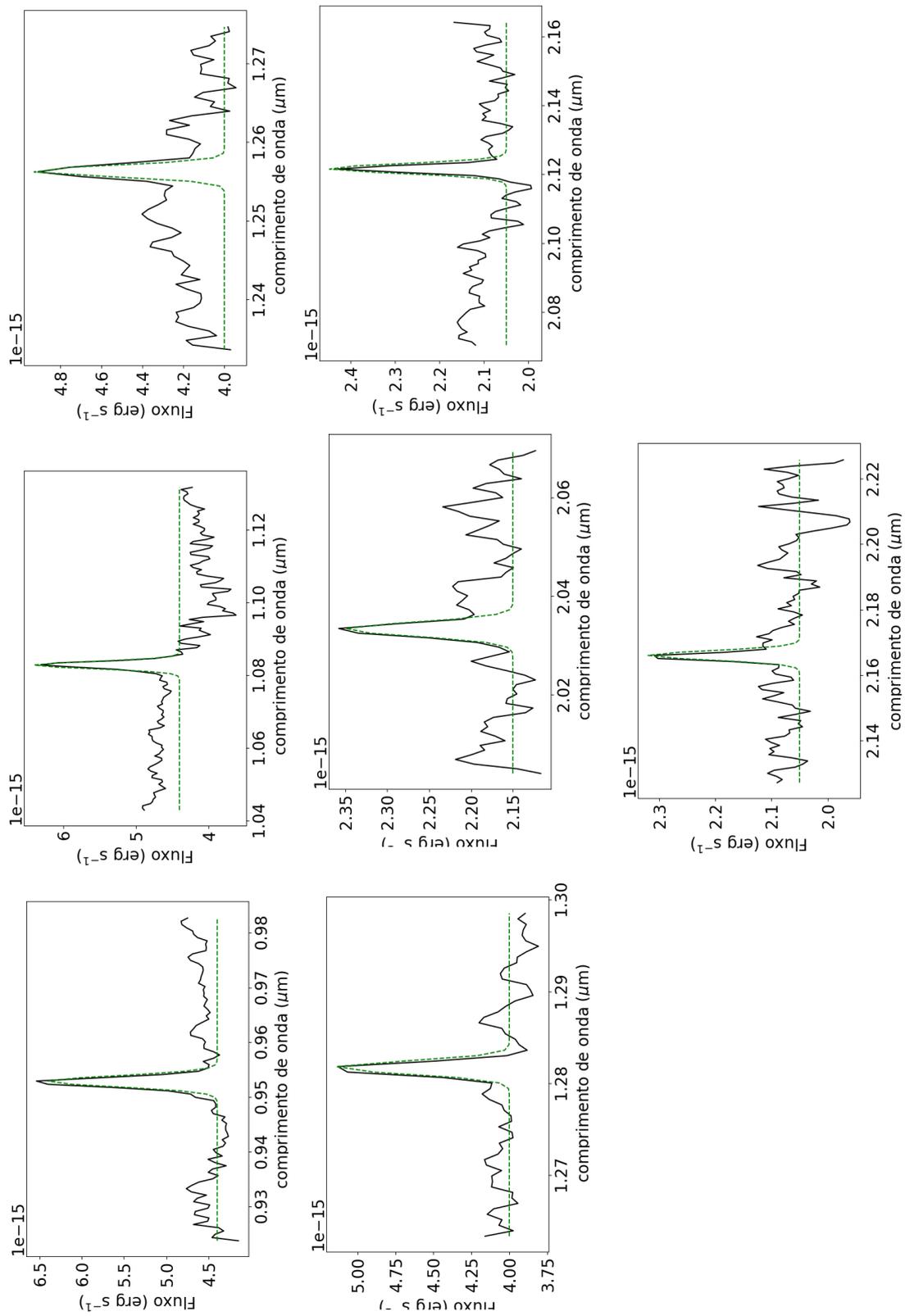


Figura A.7: Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRAS23135+2516. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

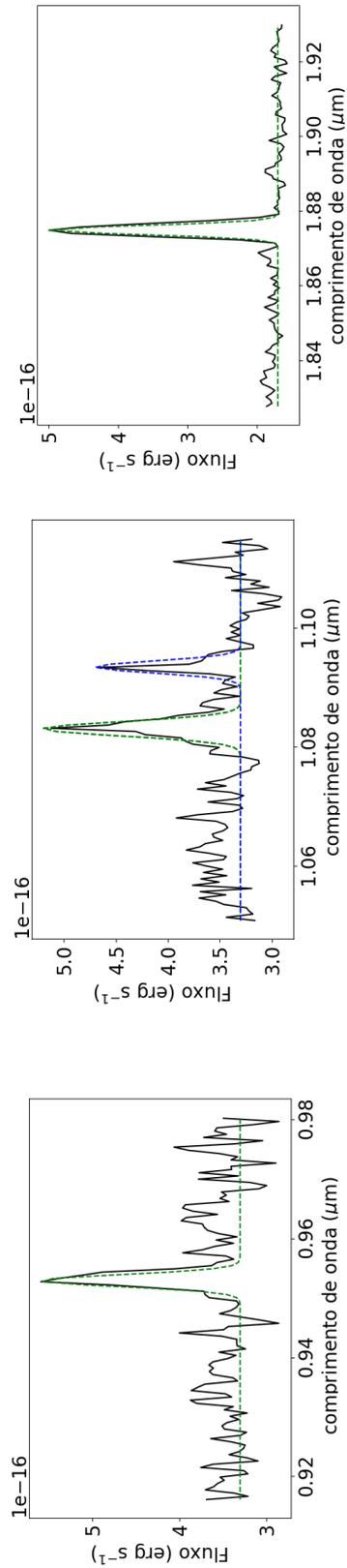


Figura A.8: Ajustes do perfil de linha da OHMGs IRASF23199+0123. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

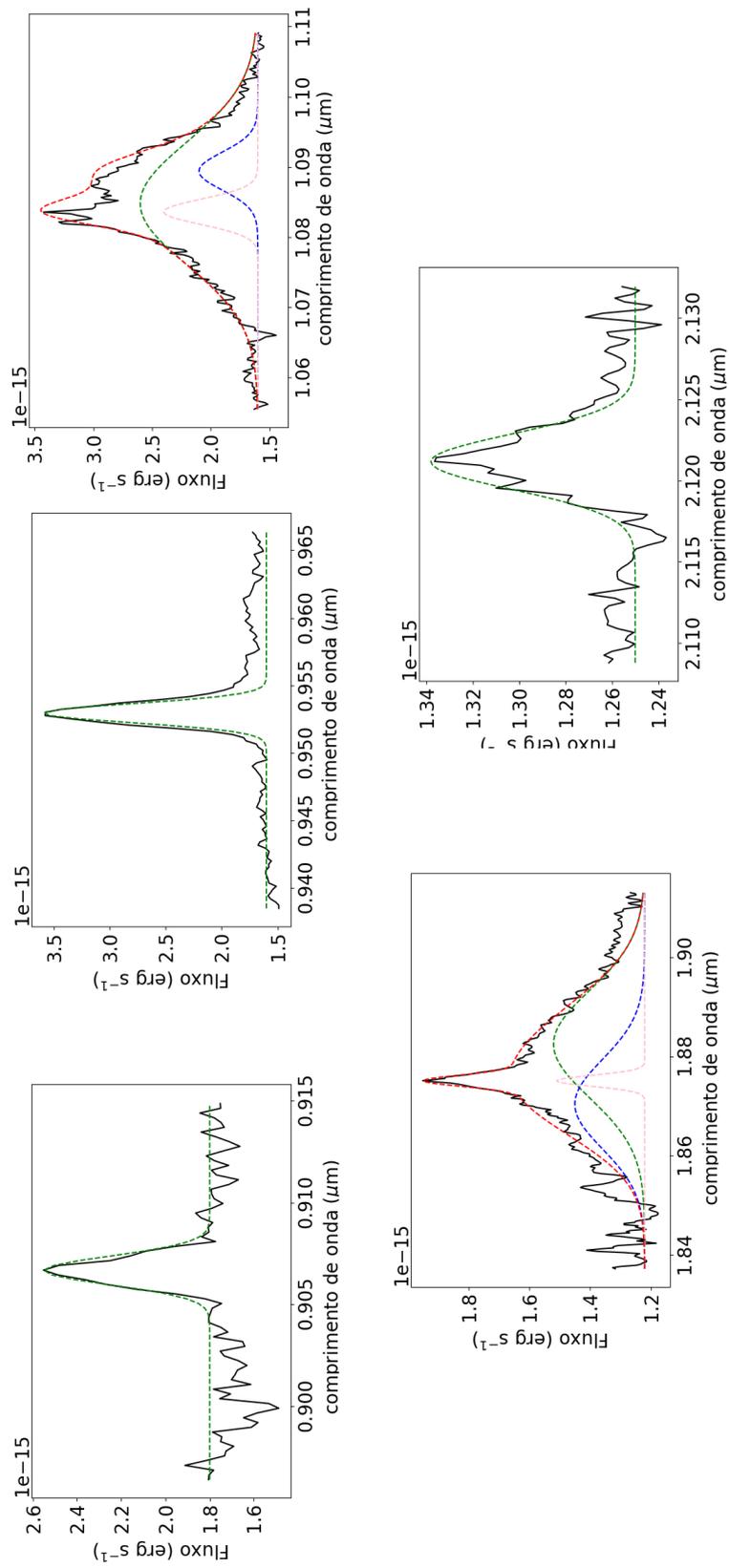


Figura A.9: Ajustes do perfil de linha da OHMGs Mrk926. As informações sobre o ajuste se encontram nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

Apêndice B 

---

Proceeding da Sociedade Astronômica Brasileira

## Near-infrared study of OH megamaser galaxies

Waldas Silva-Oliveira<sup>1</sup>, Dinalva A. Sales<sup>1</sup>, Andrew Robinson<sup>2</sup>, Luis Colina<sup>3</sup>, Alberto Rodriguez-Ardila<sup>4</sup>, Miguel Pereira-Santaella<sup>3</sup>, Jack Gallimore<sup>5</sup>, Rogemar A. Riffel<sup>6</sup>, Thaisa Storchi-Bergmann<sup>7</sup>, Christopher O’Dea<sup>2,8</sup>, & Stefi Baum<sup>8,9</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Matemática, Estatística e Física, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande 96203-900, Brazil e-mail: [silva.waldas@gmail.com](mailto:silva.waldas@gmail.com), [dinalvaires@gmail.com](mailto:dinalvaires@gmail.com)

<sup>2</sup> School of Physics and Astronomy, Rochester Institute of Technology, 84 Lomb Memorial Drive, Rochester, NY 14623, USA e-mail: [axrps@rit.edu](mailto:axrps@rit.edu)

<sup>3</sup> Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA), Carretera de Ajalvir, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, Spain a e-mail: [colina@cab.inta-csic.es](mailto:colina@cab.inta-csic.es), [miguel.pereira@physics.ox.ac.uk](mailto:miguel.pereira@physics.ox.ac.uk)

<sup>4</sup> Laboratório Nacional de Astrofísica, Rua dos Estados Unidos 154, 37504-364, Itajubá, MG, Brazil e-mail: [aardila@lna.br](mailto:aardila@lna.br)

<sup>5</sup> Department of Physics, Bucknell University, Lewisburg, PA 17837, USA e-mail: [jack.gallimore@bucknell.edu](mailto:jack.gallimore@bucknell.edu)

<sup>6</sup> Departamento de Física, CCNE, Universidade Federal de Santa Maria, 97105-900, Santa Maria, RS, Brazil e-mail: [rogemar@ufsm.br](mailto:rogemar@ufsm.br)

<sup>7</sup> Departamento de Astronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 9500, Porto Alegre, 91501-970, Brazil e-mail: [thaisa@ufrgs.br](mailto:thaisa@ufrgs.br)

<sup>8</sup> University of Manitoba, Winnipeg, Canada, e-mail: [odeac@umanitoba.ca](mailto:odeac@umanitoba.ca), [stefibaumodea@gmail.com](mailto:stefibaumodea@gmail.com)

<sup>9</sup> Carlson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, 54 Lomb Memorial Dr. Rochester, NY 14623

Received

**Abstract.** OH megamaser galaxies (OHMGs), a subset of Ultra-Luminous Infrared Galaxies (ULIRGs), are of particular interest because they may represent a critical short-lived transition phase connected to the onset of rapid nuclear fueling, which in turn leads to the development of a circum-nuclear gas disk and the initiation of Active Galactic Nuclei (AGN) or starburst winds. In this study, we present Near-Infrared (NIR) spectroscopic study of 9 OH Megamaser Galaxies (OHMGs), which 5 were observed using NASA Infrared Telescope Facility (IRTF)/SpeX spectrograph in cross-dispersed mode and 4 were observed using William Hershel Telescope (WHT)/LIRIS, both observations covered the range in the interval of 0.7 to 2.4 $\mu$ m. OHMGs of our sample showed interesting features - among them we have spectra dominated by strong emission lines of HI, HeI, HeII, [SII], [FeII], as well as molecular hydrogen. We can also see CN and CO absorption lines, which are related to population of the red (super)giants in the nuclear region. We could conclude that two galaxies in our sample host an AGN, while other two are starburst galaxies.

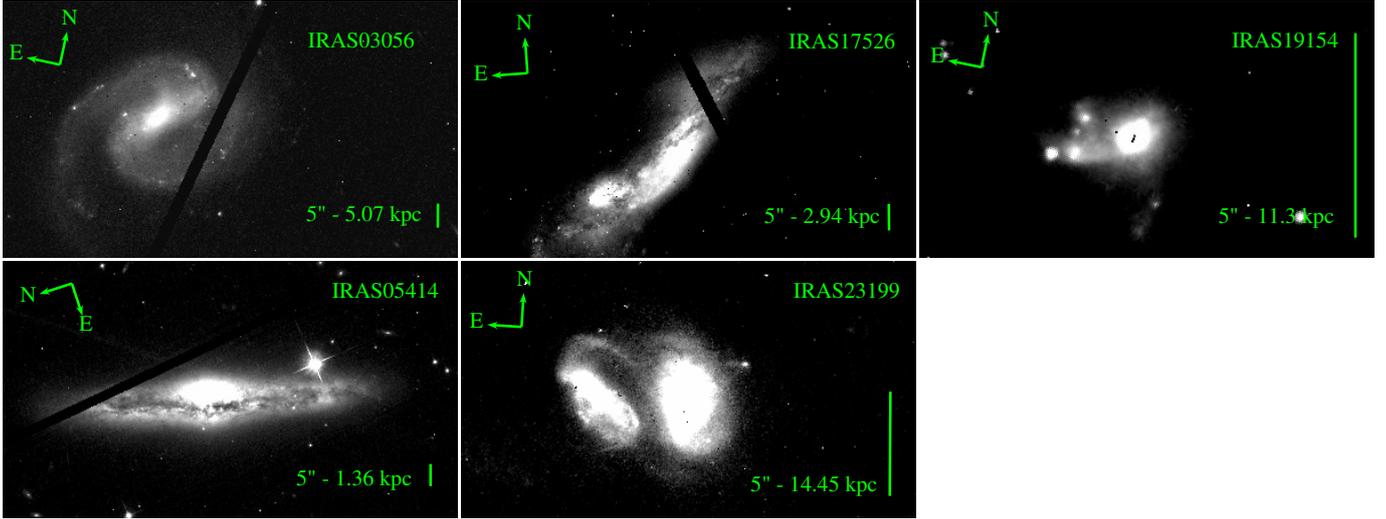
**Resumo.** Galaxias Megamaser de OH (OHMGs), um subconjunto de Galaxias Ultra Luminosas no Infravermelho (ULIRGs), são de particular interesse porque podem representar uma fase crítica de transição de curta duração ligada ao início do rápido abastecimento de combustível nuclear, que por sua vez leva ao desenvolvimento de um disco de gás circum-nuclear e o início de ventos do tipo Nucleo Ativo de Galaxias (AGN) ou starburst. Neste estudo, apresentamos dados espectroscópicos NIR de 9 OHMGs, dos quais 5 foram observados usando o espectrógrafo NASA Infrared Telescope Facility (IRTF) / SpeX no modo dispersão cruzada e 4 foram observados usando William Harshel Telescope (WHT) / LIRIS, ambas as observações cobriram a faixa no intervalo de 0,7 a 2,4 $\mu$ m. OHMGs da nossa amostra mostraram características interessantes entre eles temos espectros dominados por linhas de emissão forte de HI, HeI, HeII, [SII], [FeII], bem como hidrogênio molecular. Podemos também ver as linhas de absorção CN e CO, que estão relacionadas com a população dos gigantes (super) vermelha. Foi possível concluir que duas galáxias em nossa amostra possuem um AGNs, enquanto outras duas galáxias são foram classificadas como starburst.

**Keywords.** Galaxies: interactions–Galaxies: active–Galaxies: stellar content–ISM: molecules–Masers–Radio continuum:galaxies

### 1. Introduction

The disturbed morphologies of Luminous and Ultra-Luminous Infrared Galaxies (LIRGs and ULIRGS, respectively) suggest that these gas-rich galaxies are undergoing collisions or mergers. They are thought to represent a key stage in galaxy evolution in which tidal torques associated with mergers drive gas into the galaxy core, leading to starbursts and fueling an embedded AGN, with ULIRGS reaching quasar-like powers at infrared wavelengths ( $> 10^{11} L_{\odot}$ ). OHMGs is a subset of ULIRGs that radiate lines

at 1665 and 1667 MHz and there are evidence that they contain an energetically important, dust-obscured AGNs. Physical properties that distinguish OHM hosts from other [U]LIRGS are: (i) OHMGs have the highest mean molecular gas densities,  $(H_2)=10^{3-4} \text{cm}^{-3}$ , (ii) OHM hosts are a distinct population in the nonlinear part of the IR-CO relation; and (iii) their hosts have exceptionally high dense molecular gas fractions ( $L_{HCN}/L_{CO} > 0.07$ ), perhaps associated with a temporal spike in tidally driven density gas inflow (e.g. Ho 2005; Lo 2005; Perr & Dyson 1985; Soifer et al. 1987; Scoville & Norman 1989; Sanders et al. 1988). In



**Figure 1.** Galaxies that were observed using NIR spectroscopy data. Images obtained with ACS F814W (i band) of our OHMG sub-sample observed in Cycle 17 of the Hubble Space Telescope. The vector in the bottom right corner represents 5 arcseconds.

this context, OHMGs are therefore signposts marking the most intense, compact, and unusual modes of [U]LIRGS in the local universe.

Early surveys have shown that OHMGs tend to be found in warmest ULIRGs and there is continuing debate as to whether starbursts or AGNs are the dominant sources of dust and gas heating. It also remains unclear how the OH maser emission is related to the nature of the dominant heating source and to the other components of the host galaxies (see Sanders et al. 1988; Treister et al. 2012, and references therein). To address the issues, we are carrying out a comprehensive multiwavelength space and ground study of a large sample ( $\sim 70$  objects) of OHMGs with the overall objective of relating the merger state of the OHMG (as traced by the structural properties of the spheroid, including dynamical masses) to the growth phase of the AGN, the nuclear starburst, and the concentration and structure of the ionized gas and radio morphology (Sales et al. 2015; Hekatelyne et al. 2018a,b, Sales et al. 2018 submit). Keeping this in mind, we aim to derive the relative contributions of the embedded AGN and/or starburst activities using near-infrared (NIR) spectroscopy data and we are presenting here a NIR study of 9 OHMG galaxies presented in Figure 1.

## 2. OBSERVATION AND DATA REDUCTION

In this study, we present NIR spectroscopic data of 9 OHMGs, of which 5 were observed using SpeX spectrograph. SpeX is a medium resolution spectrograph ( $R = \Delta\lambda/\lambda \sim 2000$ ) that in cross-dispersed mode covers the range in the interval of  $0.7$  to  $2.4\mu\text{m}$ . This instrument was constructed at the Institute of Astronomy, by the NASA Infrared Telescope Facility (IRTF). The other 4 galaxies were observed by the William Herschel Telescope (WHT) using LIRIS spectrograph with two low-resolution ( $R = 1000$ ) covering same spectral range of SpeX with two ZJ and HK grisms. Data were obtained in 2014b (WHT/LIRIS: PI - Colina L.) and 2016-B (IRTF/SpeX 2016B125: PI - Sales D.). Observation were executed nodding in an AB-BA source pattern and A0V stars were observed close to the galaxies in order to provide telluric standards at sim-

ilar airmasses. Table 1 shows information about the our sample and the observation conditions.

Data reduction were performed using SPEXTOOL, which is a code provide by the SpeX team for the IRTF community<sup>1</sup>. To derive emission line fluxes we use our own routine written in python, as well as a package in IRAF software. Figure 2 shows OHMG spectra with normalized fluxes at  $1.2\mu\text{m}$ . Noise coming from the low atmospheric transition was removed and emission lines have been identified (see Figure 2).

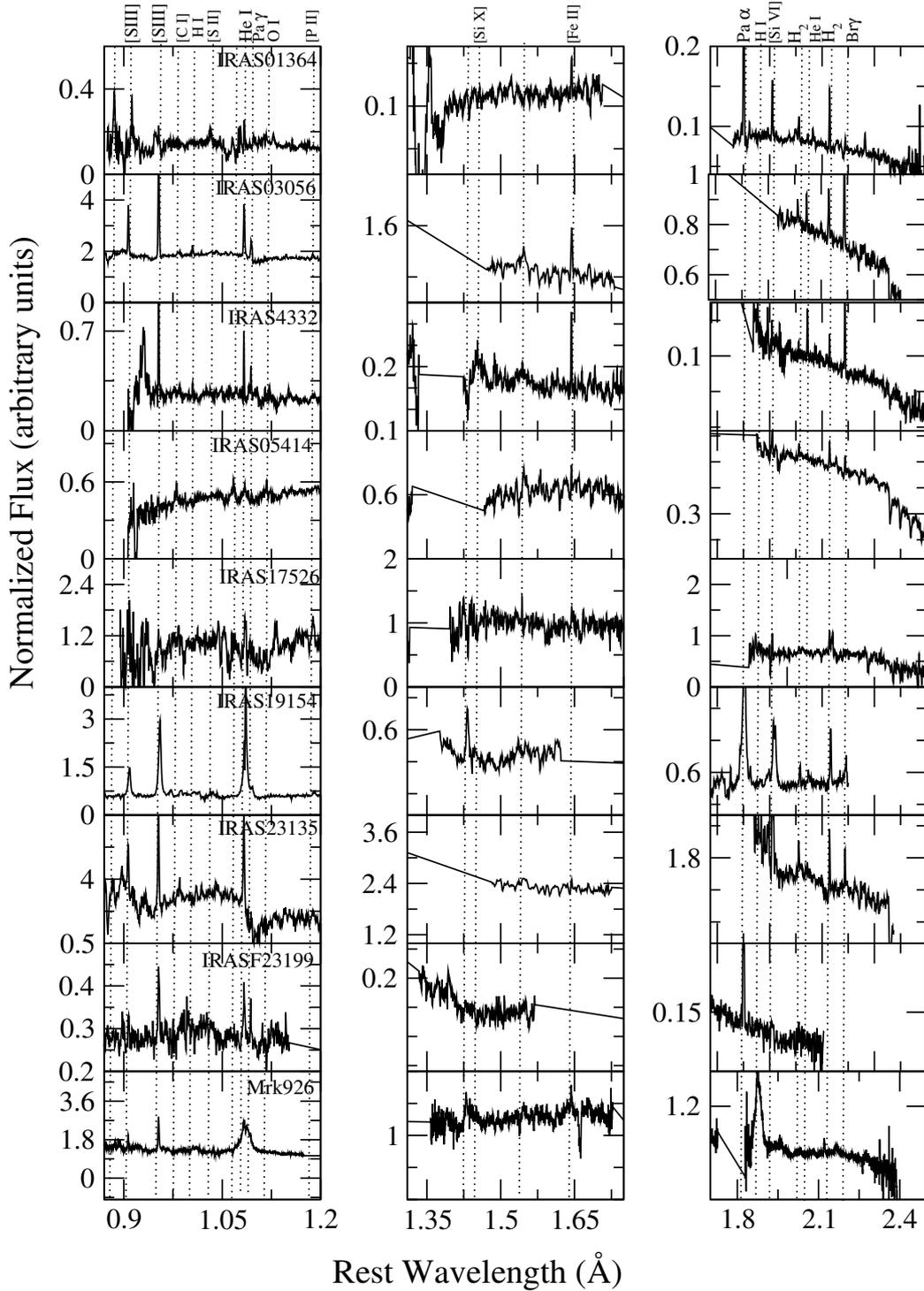
## 3. RESULTS AND DISCUSSION

We can see in Figure 2 that NIR spectra of our sample are dominated by ionic lines with low and high ionization species, molecular hot  $\text{H}_2$  lines, and hydrogen recombination lines. The following emission lines were observed at least  $3\sigma$  of the noise: [S III] $0.9\mu\text{m}$ , Pa $\delta$ , He $1.08\mu\text{m}$ , [Fe II] $1.2-1.6\mu\text{m}$ , Pa $\alpha$ ,  $\text{H}_2$  $1.9-2.2\mu\text{m}$ , and Br $\gamma$  emission lines. From Figure 2 we can also see that IRAS19154+2704 presents broad-emission components in the hydrogen recombination lines similar to Seyfert 1 Mrk926 (for comparison).

Our OHMG sample not only presented ionic, hot molecular  $\text{H}_2$  lines, and hydrogen recombination lines but also CO molecular bands at  $2.29$ ,  $2.32$  and  $2.35\mu\text{m}$  (Figure 3). According to evolutionary population synthesis and confirmed in some extragalactic observation CN ( $1.1\mu\text{m}$ ) and CO ( $2.3\mu\text{m}$ ) bands are features arising from stars in the thermally pulsing asymptotic giant branch (TP-AGB) phase. These signatures have been used as a clear feature of the presence of young/intermediate ( $0.3 \leq t \leq 2$  Gyr) stellar population, which highlights a presence of starburst activities (Rieke et al. 1980; Maraston 2005; Riffel et al. 2007, 2008).

In order to investigate excitation mechanisms of our OHMG's sample we present a diagnostic diagram suggested by Rodríguez-Ardila et al. (2004) that uses emission line ratios of  $\text{H}_2$   $2.1\mu\text{m}$ , Br $\gamma$  and [FeII]  $1.2\mu\text{m}$ , Pa $\beta$  (see also (Riffel

<sup>1</sup> SPEXTOOL is available from the IRTF website: <http://irtf.ifa.hawaii.edu/Facility/spex/spex.htm>



**Figure 2.** NIR spectra of our OHMG’s sample. Spectra have normalized fluxes and rest wavelength in Åunits. Left-panels show H band, middle- and right-panels present J and K bands respectively.

et al. 2013). We had four galaxies that provided these emission lines and it is clear from this diagram that two galaxies are dominated by starburst activities.

IRAS05414+5840 was the only OHMG galaxy that fell in to AGN’s region of NIR diagnostic diagram, exhibiting a clear AGN classification (see figure 4). This galaxy has a spiral edge-on morphology (see figure 1) with a well formed bulge. IRAS19154+2704 also was classified as an AGN source because its OHMG shows broad components at Pa $\beta$ , He 1.08  $\mu$ m, Pa  $\alpha$ , and Br  $\gamma$  emission lines (Rodríguez-

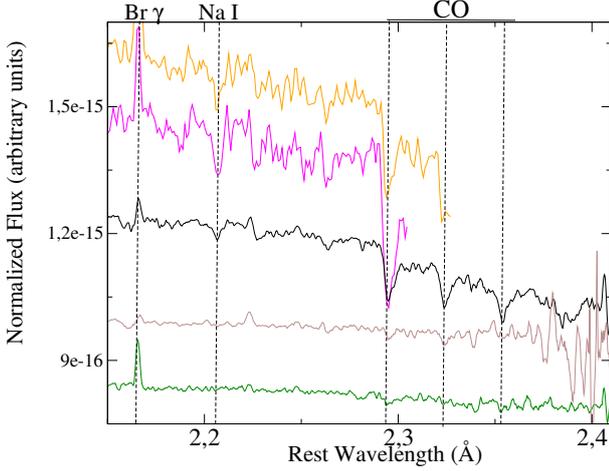
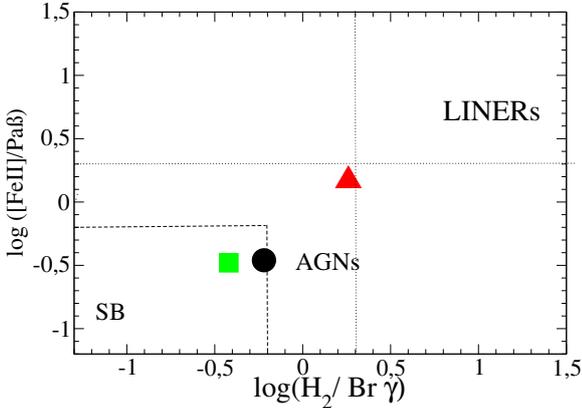
Ardila et al. 2004; Riffel et al. 2013). IRAS19154+2704 shows a point like core morphology with smaller with smaller interacting galaxies connected by tidal tails (see figure 1).

#### 4. CONCLUSIONS AND PERSPECTIVE

Of the 9 observed OHMGs, we were able to derive excitation mechanism for three targets using a diagnostic diagram, where two of them were classified as Starburst galaxies and

**Table 1.** Observation log and basic galactic properties for the sample.

ID (1)	Galaxy (2)	$z$ (3)	R.A. (4)	DEC (5)	Type (6)	Airmass (7)	Date of Observation (8)	On-source Integration time (h) (9)	PA ( $^{\circ}$ ) (10)
1	Mrk 926	0.04686	23h04m43.478	-08d41m08.62s	-	1.137	09-14-2016	0.500	85.00
2	IRAS 05414+5840	0.01486	05h45m47.88s	+58d42m03.9s	S2	41.00	09-14-2016	0.150	41.00
3	IRAS 01364-1042	0.04825	01h38m52.921	-10d27m11.42s	-	1.199	09-14-2016	0.399	150.00
4	IRAS 03056+2034	0.02744	03h08m30.710s	+20d46m20.04s	SB	1.07	09/07/2014	0.39	17
5	IRAS 04332+0209	0.01197	04h35m48.369s	+02d15m28.97s	SB	1.399	09-14-2016	0.449	120.00
6	IRAS 17526+3253	0.02601	17h54m29.41s	+32d53m14.2s	-	1.370	09-14-2016	0.399	283.00
7	IRAS 19154+2704	0.09938	19h17m31.41s	+27d10m06.0s	-	1.000387	09-06-2014	1.5	0.00
8	IRAS 23135+2516	0.02742	23h16m00.70s	+25d33m24.1s	S2	1.031443	09-07-2014	1	25.00
9	IRAS 23199+0123	0.13569	23h22m31.63s	+01d39m28.1s	-	1	09-07-2014	1.7	95


**Figure 3.** One-dimensional spectra of our sample highlighting CO absorption lines (dashed-lines) at  $2.29 \mu\text{m}$ ,  $2.32 \mu\text{m}$  and  $2.35 \mu\text{m}$ . spectrum yellow IRAS03056+2034, pink IRAS23135+2516, black IRAS05414+5840, brown IRAS01364-1042, green IRAS332+0209 all in normalized at arbitrary flow and with wavelength in  $\mu\text{m}$ .

**Figure 4.** Diagnostic diagram of the  $\text{H}_2$   $2.1 \mu\text{m}/\text{Br}\gamma$  and  $[\text{FeII}]1.2 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$  line ratios of our OHMG's sample. Red triangle IRAS05414+5840, black circle IRAS03056+2034, green square IRAS04332+0209.

one as AGN source. Other AGN signature was found in IRAS19154+2704 by strong coronal lines as well as broad components in  $\text{Pa}\delta$ , He  $1.08 \mu\text{m}$ ,  $\text{Pa}\alpha$ , and  $\text{Br}\gamma$  emission lines. This broad emission has equivalent width comparable with those found in Seyfert 1 galaxies (see Mrk926 spectrum in figure 2). IRAS17526 + 3253 showed low signal-to-noise ratio, it being possible to observe only  $\text{H}_2$  lines at  $2.12 \mu\text{m}$

and  $\text{MgII}$  at  $2.13 \mu\text{m}$ . We also could see that most of galaxies in our sample showed CN and CO molecular absorption lines indicating presence of young/intermediate stellar population (Figure 3).

Our perspective of continuing this study will follow the next step, and aims to: Derive the stellar population of OHMGs that presented absorption lines of CN and CO. Determine the mass and kinematics of the hot (2000K) molecular gas of  $\text{H}_2$ .

*Agradecimentos.* This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. The William Herschel Telescope is operated on the island of La Palma by the Isaac Newton Group of Telescopes in the Spanish Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias. Visiting Astronomer at the Infrared Telescope Facility, which is operated by the University of Hawaii under contract NNH14CK55B with the National Aeronautics and Space Administration. Dinalva A. Sales acknowledges for NASA NNX11AI03G, CNPq Universal 01/2016, and FAPERGS/CAPES n.05/2013. Dinalva A. Sales and A. Robinson acknowledges SBF and APS for financial support received from the Brazil-U.S. Exchange Program.

## References

- Hekatelyne, C., Riffel, R. A., Sales, D., Robinson, A., Gallimore, J., Storchi-Bergmann, T., Kharb, P., O'Dea, C., Baum, S., 2018a, MNRAS, 474, 5319.
- Hekatelyne, C., Riffel, R. A., Sales, D., Robinson, A., Storchi-Bergmann, T., Kharb, P., Gallimore, J., Baum, S., O'Dea, C. MNRAS, 2018b, 479, 3966.
- Ho K. Y., 2005, ARA&A, 43, 625.
- Lo, K. Y. 2005, ARA&A, 43, 625
- Maraston, C., 2005, MNRAS, 362, 799
- Perr & Dyson, 1985, MNRAS, 213, 665.
- Rieke, Lebofsky, Thompson, Low, Tokunaga, 1980, ApJ, 238, 24.
- Riffel, R.; Pastoriza, M. G.; Rodríguez-Ardila, A.; Maraston, C., 2007, ApJ, 659, 103
- Riffel, Pastoriza, Rodríguez-Ardila, A., & Maraston, 2008, MNRAS, 388, 803.
- Riffel, R. A., Storchi-Bergmann, T., & Winge, C. 2013, MNRAS, 430, 2249
- Rodríguez-Ardila et al, 2004, A&A, 425, 457.
- Treister, E., Schawinski, K., Urry, C. M., & Simmons, B. D. 2012, ApJL, 758, L39
- Sales, Robinson, Axon, Gallimore, Kharb, Curran, O'Dea, Baum, Elitzur, Mittal, 2015, ApJ, 799, 28.
- Sanders, D. B., Soifer B. T., Elias, J. H., Neugebauer, G. Matthews, K. 1988, ApJ. 328, L35.
- Scoville & Norman 1989, IAUS, 134, 65.
- Soifer et al. 1987, ApJ 320, 238.