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

Douglas Alves da Silva

# Cinemática e excitação do gás em galáxias com emissão megamaser de OH: o caso da IRAS 06487+2208

Rio Grande 2023

Douglas Alves da Silva

# Cinemática e excitação do gás em galáxias com emissão megamaser de OH: o caso da IRAS 06487+2208

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física.

Área de Concentração: Astrofísica Orientador(a): Dra. Dinalva A. Sales

Rio Grande 2023

### Ficha Catalográfica

S586c	Silva, Douglas Alves da. Cinemática e excitação do gás em galáxias com emissão megamaser de OH: o caso da IRAS 06487+2208 / Douglas Alves da Silva. – 2023. 81 f.		
	Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Física, Rio Grande/RS, 2023. Orientadora: Dra. Dinalva Aires de Sales.		
	1. Galáxias 2. Starburst 3. AGN 4. OHMG 5. ULIRGs I. Sales, Dinalva Aires de II. Título.		
	CDU 53		

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

## Cinemática e excitação do gás em galáxias com emissão megamaser de OH: o caso da IRAS 06487+2208

Douglas Alves da Silva

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Dinalva Aires de Sales

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física no Curso de Mestrado em Física, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada por:

DINALVA AIRES DE<br/>SALES:316815198Assinado de forma digital<br/>por DINALVA AIRES DE<br/>SALES:31681519801<br/>Dados: 2023.08.29<br/>20:34:50 -03'00'

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Dinalva Aires de Sales

Documento assinado digitalmente FABRICIO FERRARI Data: 30/08/2023 09:12:19-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Fabrício Ferrari



Prof. Dr. Rogemar Riffel

**Rio Grande** 

Agosto de 2023

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família por ter me dado o conforto e incetivo para continuar nesta jornada.

Agradeço a minha orientadora, Dr<sup>a</sup> Dinalva Aires de Sales, por todo ensinamento e por toda sabedoria que me transferiu durante o mestrado.

Agradeço ao Professor Dr. Rogemar e ao grupo de astrofísica da UFSM por todo suporte dado durante a mobilidade acadêmica em que tive a honra de fazer durante o mestrado.

Agradeço aos amigos por sempre estarem ao meu lado me apoiando, especialmente a galera do "Surtados da astro", Rose e William, e também aos amigos de Rondônia.

Aos Docentes do programa pelas aulas ministradas por eles.

Aos funcionários da universidade, principalmente os da Secretaria, e as mulheres da limpeza que sempre me trataram muito bem.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande por ter compromisso de levar um ensino de qualidade e gratuito aos brasileiros e ao Instituto de Matemática, Estatística e Física pela oportunidade de concluir o Mestrado em física.

A Capes pela bolsa concedida.

"Falei tanto sobre vida e morte, sobre viver o presente, sobre legado, que não me parecia correto sair à francesa e deixar o leitor no vácuo. Então a gente já combina aqui: nesta história a menina não morre no final. Ela vive: nas palavras. E isso basta."

Ana Michelle Soares (\*1983 - <sup>†</sup>2023), ativista do movimento paliativista - Entre a lucidez e a esperança: Um olhar sobre a finitude para quem não tem tempo a perder.

### Resumo

Neste trabalho realizamos um estudo à cerca a galáxia megamaser de OH (OHMG) IRAS 06487+2208 onde o principal objetivo foi investigar o mecanismo de excitação e a cinemática do gás ionizado. Para isso, usamos dados espectroscópicos no óptico no modo IFU obtidos com o instrumento GMOS/GEMINI e também fez-se uso de imagens da banda i (F814W) obtidas com telescópio espacial Hubble (HST) e dados em Rádio com o radio-interferômetro VLA. A emissão magamaser de OH (OHM) tem-se mostrado uma característica importante dentro do cenário de evolução das galáxias [ultra] luminosas no infravermelho ([U]LIRGs), pois as galáxias que emitem megamaser de OH, ao que tudo indica, estão em um momento crítico de sua evolução, isso sinaliza que essas galáxias podem estar próximo da ativação do seu buraco negro supermassivo. No caso de IRAS 06487+2208 nossos estudos sugerem que esta galáxia é um sistema formado por duas galáxias que estão em processo de colisão e estão a 702 Mpc de distância, em que uma galáxia maior está capturando a galáxia menor, isso faz com que o gás aumente sua densidade criando regiões de formação estelar, o que se verifica com os diagramas diagnósticos BPT e WHAN que foram construídos a partir das razões de linhas presente no espectro da galáxia que por sua vez foram ajustados pelo software IFSCube. Entretanto, o estudo ainda sugere que existe um buraco negro supermassivo em processo de ativação embutido em uma região de poeira mas que ainda não é a fonte de energia dominante na galáxia.

### Abstract

In this work we carried out a study about the megamaser galaxy of OH (OHMG) IRAS 06487+2208 where the main objective was to investigate the capture mechanism and the kinematics of the ionized gas. For this, we used optical spectroscopic data in IFU mode obtained with GMOS/GEMINI and also made use of images of the band *i* (F814W) accepted with Hubble space acceptance (HST) and Radio data with accepted VLA. The OH megamaser emission (OHM) has been shown to be an important feature within the evolution scenario of [ultra] luminous infrared galaxies ([U]LIRGs), since the galaxies that emit OH megamaser, by all indications, are at a critical moment in their evolution, this signals that these galaxies may be close to activating their supermassive black hole. In the case of IRAS 06487+2208 our studies suggest that this galaxy is a system formed by two galaxies that are in the process of colliding and are 702 Mpc away, in which a larger galaxy is capturing the smaller galaxy, this makes the This system's gas is enhanced by creating regions of star formation, which is verified with the BPT and WHAN diagnostic diagrams, which were constructed from the ratios of lines present in the galaxy's spectrum, which in turn were adjusted by the IFSCube software. However, the study still suggests that there is a supermassive black hole in the process of activating a keyboard in a region of dust, but that it is not yet the dominant energy source in the galaxy.

# Lista de Figuras

1.1	Uma seleção de galáxias infravermelhas luminosas	19
1.2	Diagrama mostrando o processo de emissão estimulada. Imagem retirada	
	do site: https://en.wikipedia.org/wiki/Megamaser	21
1.3	A vista composta mostra uma imagem ALMA Band $5$ do sistema galáctico	
	em colisão Arp 220, disponível em https://www.eso.org/public/news/eso1645/	23
1.4	Luminosidade IR vs. luminosidade da linha CO	24
1.5	galáxia IIIZw35	25
1.6	Esboço da geometria proposta para o fenômeno OHM da galáxia IIIZw 35 $% = 100000000000000000000000000000000000$	26
1.7	As galáxias Antena	28
1.8	Espectros de 4 galáxias Starburst normalizadas	29
1.9	O quasar PKS 2349 localizado no centro de uma galáxia	31
1.10	Contínuo típico de AGNs	32
1.11	Espectros de galáxias de Seyfert 1 e 2	35
1.12	Imagem ilustrando o modelo unificado de AGNs	37
1.13	Diagramas BPT	40
1.14	Diagrama BPT de linhas de emissão	40
1.15	Diagrama WHAN que separa objetos extragalácticos em Star Forming (SF),	
	sAGN (Seyferts), wAGN (LINERs), Galáxias aposentadas e Galáxias pas-	
	sivas. (Cid Fernandes et al., 2011)	42
2.1	espectroscopia de campo integral	47
2.2	Imagens do Telescópio Gemini	47
2.3	Ajuste Bi-Gaussiano	53
2.4	Ajuste do perfil de linhas de emissão	54

3.1	Imagem da galáxia em diferentes bandas espectrais	56
3.2	Mapas bidimensionais do fluxo das linhas de emissões ópticas estreitas	58
3.3	Mapas bidimensionais do fluxo das linhas de emissões ópticas largas	58
3.4	Mapas bidimensionais da velocidade das linhas estreitas em k m $\rm s^{-1}.$ Fonte:	
	do autor	59
3.5	Mapas bidimensionais da velocidade das linhas largas em km s $^{-1}.$ Fonte:	
	do autor	59
3.6	Mapas bidimensionais da dispersão de velocidade das linhas estreitas em km $$	
	$\rm s^{-1}.$ Fonte: do autor	60
3.7	Mapas bidimensionais da dispersão de velocidade das linhas largas em km	
	$\rm s^{-1}.$ Fonte: do autor	61
3.8	Mapas bidimensionais da razão entre linhas estreitas. Fonte: do autor. $\ $ .	62
3.9	Mapas bidimensionais da razão entre linhas largas. Fonte: do autor	62
3.10	Regiões usadas para medir razões entre linhas no diagrama BPT	64
3.11	Mapas de densidade eletrônica de linhas estreitas e linhas largas ([SII] $\lambda 6716/\lambda 6$	731). <mark>65</mark>
3.12	Mapas da extinção interestelar $F_{H\alpha}/F_{H\beta}$	65
3.13	Diagramas de diagnóstico das linhas estreitas de IRAS 06487+2208 $\ldots$ .	68
3.14	Diagramas de diagnóstico das linhas largas de IRAS 06487+2208	69
3.15	Diagrama WHAN	70

# Lista de Tabelas

3.1	Proporções de linhas estreitas derivadas de dados GMOS/IFU	 •••	64
3.2	Proporções de linhas largas derivadas de dados GMOS/IFU $~$ .	 •••	66

# Sumário

1.	1. Introdução $\ldots$				
	1.1	Galáxias [U]ltra-Luminosas no Infravermelho			
	1.2	Galáxias MegaMASERS			
		1.2.1	Emissão MASER	20	
		1.2.2	Galáxias MegaMASERS de OH	22	
	1.3	Galáxi	as Starburst	27	
	1.4	Galáxias com núcleo ativo			
		1.4.1	Galáxias LINERs	32	
		1.4.2	Galáxias de Seyfert	33	
		1.4.3	Modelo Unificado de AGNs	35	
1.5 Diagramas Diagnósticos no Óptico - BPT e WHAN					
	1.6	Objeti	VOS	42	
2.	Met	odologia	a e tratamento dos dados	45	
	2.1	Observação dos dados			
		2.1.1	Observação e tratamento dos dados de IFU obtidos pelo Gemini $% \mathcal{T}_{\mathrm{e}}$ .	45	
		2.1.2	Observação e tratamento dos dados obtidos pelo HST	48	
		2.1.3	Observação e tratamento dos dados obtidos pelo VLA	48	
2.2 Tratamento dos Dados				49	
	2.3	Subtra	ção das Populações estelares	49	
	2.4	Ajuste	das linhas de emissão	50	
3.	Resi	iltados	e discussões à cerca da OHMG IRAS 06487 $+2208$	55	
	3.1	Result	ados do VLA e HST	55	

3.2	2 Análise de dados GMOS/IFU: Cinemática do Gás		
	3.2.1	Mapas de razão entre linhas, densidade eletrônica e extinção do meio	
		interestelar	61
	3.2.2	Excitação do gás e diagramas diagnóstico	66
3.3	A nat	ureza da emissão nuclear e comparação com estudos anteriores	71
3.4	Conclu	usões	73
Referen	clas .		75

Capítulo

## Introdução

### 1.1 Galáxias [U]ltra-Luminosas no Infravermelho

As Galáxias são grandes estruturas formadas por vários corpos celestes como estrelas, gás, poeira, e matéria escura ligados pela força gravitacional. E podem apresentar formas, cores e tamanhos diferentes. Edwin Hubble (1889-1953) classificou as Galáxias de acordo com sua morfologia, dividindo-as em espirais, espirais barradas, elípticas, lenticulares ou irregulares. Seus processos de evolução e transformações foram descobertos pela ciência ao longo da modernização dos estudos astronômicos. A maioria das galáxias, são chamadas "normais", apresentam um espectro dominado por linhas de absorção, resultado do espectro combinado das estrelas. Algumas linhas em emissão fracas são observadas, emitidas pelo gás nas regiões de formação estelar. Fath (Fath, 1909) observando "nebulosas espirais" notou que uma galáxia (NGC 1068 = M77) possuía linhas em emissão brilhantes:  $H_{\beta}$ , [OII] 3727 Å, [NIII] 3869 Å, [OIII] 4363, 4959, e 5007 Å.

Hubble também detectou estas linhas em outras galáxias, Seyfert (Seyfert, 1943a) afirmou que uma fração dessas "nebulosas espirais" possuíam linhas em emissão largas, produzidas por átomos ionizados. Hoje sabemos que estas galáxias com presença de linhas fortes de emissão e alta luminosidade são galáxias com núcleos ativos (AGN, do inglês "Active Galactic Nuclei") a energia emitida pelo núcleo é responsável pelas linhas mais fortes e largas que aquelas observadas nas galáxias normais.

As galáxias são consideradas tijolos fundamentais do universo, e emitem radiação ao longo do espectro desde altas frequências (raios gama) até baixas frequências (ondas de radio). Dentre os objetos mais luminosos do Universo, estão as chamadas galáxias Ultra-Luminosas no Infravermelho ([U]LIRGs, do inglês "[U]ltra Luminous Infra-red Galaxies"), que são galáxias que apresentam uma luminosidade no comprimento de onda do infravermelho no qual ultrapassam  $10^{11}L_{\odot}$  e  $10^{12}L_{\odot}$ . Foram descobertas com o lançamento do satélite IRAS (do inglês "Infra-Red Astronomy Sattelite") em janeiro de 1983, onde foram detectadas cerca de 350 mil fontes infravermelhas.

As [U]LIRGs tem propriedades interessantes na qual a luminosidade emitida no infravermelho é aproximadamente equivalente a luminosidade bolométrica (luminosidade total emitida pela galáxia considerando as emissões em todos os comprimentos de onda), e também, a razão  $\frac{L_{ir}}{L_{opt}}$  possui um valor alto ( $\frac{L_{ir}}{L_{opt}} > 50$ , para [U]LIRGs), onde  $L_{ir}$  representa a luminosidade em comprimento de onda do infravermelho, e  $L_{opt}$  representa a luminosidade em comprimento de onda do óptico (Soifer et al., 1987). A quantidade de energia total emitida pelas galáxias [U]LIRGs é comparável aos quasares (do inglês "Quasi stellar objects"), que eram conhecidos como os objetos mais energéticos do universo.

Resultados recentes colocaram as [U]LIRGs em evidência no cenário cósmico. Originalmente, essas galáxias eram consideradas pouco mais do que uma "esquisitice" local, mas os últimos levantamentos IR mostraram que as [U]LIRGs são muito mais numerosas em alto redshift, e também tem sido investigado diferenças físicas entre [U]LIRGs de alto e baixo redshift em seus modos de formação e ambiente local, entender os processos físicos e os estágios de evolução dessas galaxias é de primordial importância para a Astronomia, a origem da fonte de energia dessas galáxias pode estar relacionada com a alta população de estrelas jovens e quentes (um "Starburst") ou um buraco negro muito massivo acumulando matéria em um ritmo rápido. Embora a distinção entre essas duas fontes foi inicialmente (e mesmo agora) tenha provado ser muito difícil, pensa-se agora que, pelo menos localmente, as [U]LIRGs são principalmente alimentadas por um starburst, mas frequentemente com uma contribuição AGN significativa (Lonsdale et al., 2006).

Estudos modernos em Astrofísica indicam que a grande maioria das [U]LIRGs estão embutidas em processos de interação ou fusão, nesses processos, grandes massas de gás e poeira encontram-se em sua região nuclear causando o intenso brilho que são detectados pelos telescópios, os objetos mais luminosos do universo estão embutidos em processos de fusão mais avançados o que explica a grande luminosidade dessas galáxias, como mostra a figura 1.1, onde podemos ver um conjunto de galaxias [U]LIRGs com alta taxa de formação estelar, no cenário de evolução galáctica a fusão de duas galáxias espirais ricas em gás tem como resultado uma galáxia luminosa no infravermelho (LIRG), que em seguida evolui para uma [U]LIRG, depois para um Quasar e por fim se torna uma galáxia elíptica.

As [U]LIRGs locais residem em ambientes de densidade relativamente baixa e devem evoluir para sistemas esferoidais com as fusões de galáxias que são responsáveis pela ativação das [U]LIRG. Embora de natureza dramática as LIRGs e [U]LIRGs no Universo local são raras, elas contribuem com apenas  $\sim 6\%$  da densidade total de energia luminosa infravermelha, e cerca de  $\sim 3\%$  da densidade total de energia (Meza et al., 2003). Embora os conjuntos de dados IRAS estejam disponíveis a quase 40 anos, eles são muito pouco explorados. A partir da data de publicação existem mais de 37.000 galáxias com brilho infravermelho no IRAS Faint Source Catalog (FSC) que nunca foram observados com qualquer outro instrumento e relatados em qualquer artigo de jornal. Apenas 43% das 64.606 fontes de FSC extragaláctico do banco de dados do IRAS foram incluídos em qualquer tipo de publicação (Meza et al., 2003).



*Figura 1.1:* Uma seleção de galáxias infravermelhas luminosas dos Grandes Observatórios All-sky LIRG Suvey (GOALS), Para essas galáxias terem tanta energia emitida no infravermelho significa que elas são compostas de muitas estrelas jovens. Crédito: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University) - https://en.wikipedia.org/wiki/File:Galaxies\_Gone\_Wild!.jpg

Deste modo, de acordo com estudos de Sanders et al. (1988) temos que as [U]LIRGS

configuram um papel essencial no processo de evolução das galáxias tanto no universo local quanto no universo distante, em que processos de interação gravitacional provoca a ativação do núcleo das galáxias, fazendo com que seu brilho seja amplificado por meio do aumento da poeira sendo levada ao núcleo, surgindo assim um AGN (Sales et al., 2015; Hekatelyne et al., 2018; Sales et al., 2019).

O acúmulo de gás e poeira no núcleo galáctico tem como consequência o surgimento de regiões de alta densidade  $(n(H_2) = 10^{3-4} \text{ cm}^{-3})$ , isto é, um ambiente ideal com propriedades físicas próspera para ocorrer a emissão de megamasers de hidroxila (OH), nas linhas de 1667 e 1665 MHz. Alguns estudos sugerem a possibilidade de que uma das componentes da emissão do megamaser pode estar associada com outflows de matéria com baixa densidade, mas à altas velocidades (Baan et al., 1989; Londsdale et al., 1998).

### 1.2 Galáxias MegaMASERS

#### 1.2.1 Emissão MASER

Maser (do inglês "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation") é uma Amplificação de Microondas por Emissão Estimulada de Radiação. O princípio físico por trás do fenômeno Maser é a emissão estimulada, obedecendo certas condições, um fóton com comprimento  $\lambda$  pode atingir um átomo excitado e ser absorvido e provocar a emissão de um outro fóton. Logo, o átomo emitirá dois fótons para retornar ao seu estado de energia mais baixo, ou seja, seu estado fundamental, o fóton estimulador, que passa sem sofrer qualquer tipo de alteração, e o fóton estimulado, que de acordo com a mecânica quântica tem o mesmo comprimento de onda  $\lambda$ , a mesma fase, a mesma polarização e a mesma direção de propagação que o fóton estimulador. Se cada um destes fótons estimular mais átomos, o feixe inicial de fótons será assim amplificado.

As primeiras descobertas sobre emissão estimulada de radiação devem-se a Albert Einstein, que em 1917 publicou em artigos os princípios teóricos que regem o fenômeno. Em 1953, o americano Charles H. Townes descobriu o Maser, que, aperfeiçoado pelos russos Nikolai Basov e A. M. Prokhorov, viria a dar origem ao laser, pelo que os três pesquisadores ganharam o Prêmio Nobel de física em 1964. O fenômeno maser é produzido através da emissão estimulada de átomos ou moléculas, no caso da galáxia IRAS 06487+2208 tem-se um maser de hidroxila (OH) que é de origem molecular.



*Figura 1.2*: Diagrama mostrando o processo de emissão estimulada. Imagem retirada do site: https://en.wikipedia.org/wiki/Megamaser.

A primeira detecção de um Maser astronômico ocorreu em 1963 por S.Weinreb (1963), onde foi detectado uma absorção do radical de hidroxila (OH) no espectro de Cassiopeia A, que é a mais forte fonte de ondas de rádio no céu fora do sistema solar e esteve entre as primeiras fontes a serem encontradas, em 1947. A segunda categoria molecular identificada como Maser foi a molécula de água (H<sub>2</sub>O), descoberta por Cheung, na transição em comprimento de onda de rádio entre dois estados rotacionais excitados com energias próximas (Cheung, 1969) nas nebulosas de Orion, W49 e Sgr B2. No meio interestelar, a emissão Maser ocorre naturalmente, originando-se em regiões de alta densidade (n(H<sub>2</sub>)  $\geq 10^7 cm^{-3}$ ) e perto de uma fonte com potencial de excitação (Lo, 2005).

Os masers de OH e H<sub>2</sub>O são habitualmente encontrados em galáxias e essas linhas emitem com comprimentos de onda de  $\lambda$  igual a 18cm ( $\nu = 1, 6 \text{ GHz}$ )e  $\lambda$  igual a 1,358cm ( $\nu = 22, 2 \text{ GHz}$ ) respectivamente. No meio interstelar a emissão do Maser de OH está relacionado com as regiões HII ultracompactas, já a emissão do Maser de H<sub>2</sub>O é associada a proto estrelas (Lo, 2005). Além de Masers de H<sub>2</sub>O e HO já foram detectados outras classes de Masers moleculares, nas Galáxias, os masers de H<sub>2</sub>O, HO, SiO e CH<sub>3</sub>OH são os mais comuns e podem ser classificados como interestelar ou circunstelar (Reid e Moran, 1981).

#### 1.2.2 Galáxias MegaMASERS de OH

As primeiras emissões megamasers de OH foram detectadas na galáxia NGC253 (Whiteoak e Gardner, 1973; Gardner e Whiteoak, 1975), que é uma galáxia espiral barrada localizada entre 10 e 11 milhões de anos-luz de distância. Depois foi detectado emissões megamasers em M82 (conhecida como NGC3034 e como Galáxia do Charuto Nguyen-Q-Rieu et al., 1976), uma galáxia espiral localizada na constelação de Ursa Maior a cerca de 12,7 milhões de anos-luz da Via Láctea. Ambas detecções em uma frequência de 1667 MHz e com uma largura de linha de  $\sim 75$  km s<sup>-1</sup>. Diferente dos masers galáticos de OH, a emissão dos maser nos objetos NGC253 e M82 eram 10 vezes mais intensos e não polarizados, também foi identificado que a linha de 1667 MHz era mais forte que a linha de 1665 MHz. Para explicar essa amplificação da emissão maser, foi proposto pelos Astrofísicos que deveria existir um contínuo em rádio entre a região do maser e o observador (Whiteoak e Gardner, 1973; Nguyen-Q-Rieu et al., 1976; Lo, 2005).

Um exemplo de fonte de emissão megamaser de OH bastante conhecido é a galáxia ARP220 (IC 4553), identificada com o telescópio Arecibo (Baan et al., 1982) que é uma [U]LIRG ver 1.3, a mais próxima da Terra, a 250 milhões de anos-luz de distância, onde em vermelho vemos uma imagem composta do ALMA Band 5 do sistema de galáxias em colisão e em azul/verde vemos imagem do telescópio espacial Hubble. Sua produção de energia foi descoberta pelo IRAS como sendo dominada pela parte do infravermelho distante do espectro. Essa galáxia possui luminosidade de (~ 400 L<sub> $\odot$ </sub>), cerca de 10<sup>8</sup> vezes maior do que a dos masers galáticos encontrados na região de W3(OH) (W3 é uma região de intensa formação estelar, localizada na constelação de Casseopeia), sendo a emissão não polarizada. Essas propriedades são semelhantes às dos masers encontrados em NGC253 e M82, mas com um maior alargamento na linha de emissão de OH, cerca de 400 kms<sup>-1</sup>, e luminosidade muito intensa, que pode ser resultado da presença de um grande número de fontes masers de OH associados com regiões HII (Baan et al., 1982).

Observações de alta resolução de algumas fontes Megamaser de OH mostram que a fonte OH Megamaser típica tem uma extensão  $\leq 100$  pc, e é encontrada em regiões de alta concentração de gás molecular  $M_{H_2} \sim 10^9 M_{\odot}$ . Megamasers de hidroxila, com luminosidade de até  $10^4 L_{\odot}$  ou mais, são encontrados apenas em galáxias luminosas no infravermelho. Existe uma relação de correlação entre a luminosidade de OH e a luminosidade do IR, que



*Figura 1.3*: A vista composta mostra uma imagem ALMA Band 5 do sistema galáctico em colisão Arp 220, disponível em https://www.eso.org/public/news/eso1645/

é de LOH  $\propto L^{1.2}$ FIR, cerca de 80% das LIRGs pesquisadas e estudadas até o momento não apresentam emissão de Megamaser OH (Lo, 2005).

Os diagnósticos de linhas de formaldeídos HCN e CO nas galáxias, segundo Darling (2007), fornecem uma visão nova sobre o fenômeno megamaser OH (OHM), sugerindo que estas linhas indicam a presença de gás denso que alimenta o fenômeno, sugerindo um gatilho de gás denso para OHMs. Em trabalho publicado por Darling (2007), foi identificado quatro propriedades físicas que diferenciam as galáxias hospedeiras OHM de outras galáxias Starburst:

- 1. OHMs têm grandes abundâncias de gases moleculares;
- 2. A maioria das OHMGs possuem densidade molecular de  $\bar{n}(H_2) = 10^3 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , onde as nuvens que emitem o radical de OH presumivelmente abrigam uma densidade de  $(H_2) > 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ;
- 3. OHMGs dispõem uma população distinta na parte não-linear da relação IR-CO;
- As galáxias que hospedam OHM detém grandes frações de gás molecular notavelmente altas, cerca de LHCN / LCO> 0,07.

Tanto a formação de estrelas quanto a atividade OHM são consequências dos aprimoramentos da densidade das marés que acompanham interações galácticas. A fração OHM



Figura 1.4: Luminosidade IR vs. luminosidade da linha CO em galáxias detectadas por HCN com propriedades OH conhecidas da amostra GS04a. A legenda indica símbolos para megamasers OH, kilomasers OH, absorvedores OH e objetos com nenhuma linha OH detectada. A linha sólida é um ajuste linear proposto por Gao e Solomon (2004b) para galáxias com  $L_{IR} < 10^{11} L_{\odot}$ , as linhas pontilhadas indicam um volume total constante de material molecular, e as linhas tracejadas indicam a densidade média de  $H_2$ derivada de Krumholz e Thompson (Darling, 2007).

em Starbursts é provavelmente devido à fração de fusões que experimentam um aumento de densidade impulsionado por maré. Os OHMs são, portanto, sinalizadores que marcam os mais intensos, compactos e modos incomuns de formação de estrelas no universo local. As pesquisas OHM de alto redshift podem portanto ser interpretadas em um contexto de formação de estrelas e evolução de galáxias, indicando tanto a taxa de fusão de galáxias quanto contribuição para a formação de estrelas.

Uma galaxia muito interessante que é amplamente estudada pelos astrônomos é a galáxia IIIZw35, na figura 1.5 podemos ver simulações da região OH juntamente com seu espectro, se trata de um par de galáxias caracterizadas por intensa emissão de maser OH, e poderoso infravermelho distante e radio contínuo, Parra et al. (2005) fizeram um



Figura 1.5: As três primeiras colunas mostram realizações de amostra da simulação de Monte-Carlo. A coluna mais à direita mostra a média acima de 100 realizações. A intensidade e o fluxo estão em unidades arbitrárias, normalizadas para seus picos. Imagens: Fila Superior: Escala de cinza e contornos representam a emissão de radiação OH integrada de velocidade convolvida com um feixe EVN+MERLIN simulado (FWHM ≈ 35 mas). Os contornos são logaritmicamente espaçados de  $2^{-1/2}$  a  $2^{-7/2}$  do pico. Linha do meio: Emissão integrada em resolução VLBI global (FWHM = 0,92 mas). Espectro: A linha sólida é o espectro integrado em toda a fonte. As linhas tracejadas e pontilhadas representam espectros tomados na tangente sul e norte respectivamente. (Parra et al., 2005).

estudo detalhado da galáxia baseado em observações ópticas, infravermelhas e de rádio. Essa galaxia é identificada como uma LINER ou Seyfert e se encontra a 110 Mpc, além disso IIIZw35 contém uma região nuclear ativa da qual o rádio contínuo, OH maser e emissão de poeira térmica são detectados. Parra et al. (2005) propuseram que o componente norte tenha um núcleo ativo compacto profundamente embutido em uma região obscura de diâmetro  $\sim 210$  pc, bem acima da média de outras OHMGs, nesta região OH ocorre a formação estelar aprimorada. A luminosidade mais baixa, componente sul é de baixa massa e está sofrendo atividade starburst sobre uma região estendida de diâmetro  $\sim$  5,5 kpc. A origem da explosão estelar e da atividade não térmica parece ser uma interação entre os dois componentes. Essa galaxia possui população estelar do tipo 1 (P01) e uma taxa de formação estelar de ~  $19M_{\odot} yr^{-1}$  (P01).

A partir de observações feitas da galáxia IIIZw35 foi proposto um modelo ajustado para o fenômeno OHM, para galaxias mais próximas é possível resolver espacialmente a emissão megamaser, como por exemplo na IIIZw35 e IC 342 que é a galáxia OHMG mais próxima de nós, neste modelo as nuvens e a emissão de OH coexistem dentro de anéis circunucleares, O modelo é circunspecto por um anel vermelho que representa a região das nuvens de maser de OH, um anel cinza representa uma Isosuperfície da emissividade contínua e distribuída de modo suave. Neste modelo também tem um bicone com absorção livre que cobre lado leste da fonte como podemos observar na figura 1.6, neste modelo o anel circunuclear tem um  $R_{in}$  de 22 pc e um raio externo  $R_{out} = R_{in} + \Delta R$ . A espessura radial do anel do maser  $\Delta R = 3$ pc, a altura do anel do maser  $\Delta H = 6$ pc, e a velocidade de rotação do anel do maser é igual a  $v_{rot} = 57$  km s<sup>-1</sup>.



*Figura 1.6:* Esboço da geometria proposta para o fenômeno OHM da galáxia IIIZw35. O anel vermelho interno representa a região onde as nuvens de OH estão confinadas. O anel cinza claro externo representa uma isosuperfície da emissividade contínua suavemente distribuída. Observe que, embora o raio do pico contínuo a emissividade está fora do anel maser OH, alguma emissão contínua interpenetra e até fica dentro do anel OH (não mostrado neste figura). Esta geometria explica a grande proporção de linha para contínuo no lado leste da fonte porque aqui a maior parte do contínuo é o fundo da OH, e o cone em em azul representa região de absorção livre-livre (Parra et al., 2005).

### 1.3 Galáxias Starburst

Uma classe de objetos galácticos extremamente interessante são as galáxias "Starburst", que são caracterizadas por uma alta taxa de formação estelar em comparação com as ditas "galáxias normais", como a Via láctea por exemplo. Enquanto a nossa galáxia está formando estrelas com uma taxa de ~  $3M_{\odot}/ano$ , a taxa de formação estelar nas Starburst está entre ~  $10 - 300 M_{\odot}/ano$  (Schneider, 2015), estima-se que 25% da formação estelar atual no Universo próximo ocorra em galáxias com surto de formação estelar (Starburst). A poeira aquecida por estrelas quentes irradia no Infravermelho distante (FIR, do inglês "far infrared") fazendo com que muitas dessas galáxias tenham fortes emissões no IR, muitos desses objetos foram descobertos pelo satélite IRAS, e por isso comumente são chamadas de ("galáxias IRAS"), e muitas dessas galáxias se encastram em LIRGs/[U]LIRGs.

A razão para esta formação estelar fortemente reforçada é presumivelmente a interação com outras galáxias ou o resultado de processos de fusão, um exemplo impressionante disso é o par de galáxias em fusão conhecido como "Antenas" mostrado na figura 1.7. Neste sistema, estrelas e aglomerados estelares estão sendo produzidos atualmente em grande número. As imagens mostram um grande número de aglomerados estelares com uma massa característica de  $10^5 M_{\odot}$ , alguns dos quais são observados pelo HST. Além disso, estrelas individuais particularmente luminosas (supergigantes) também são observadas.

As idades das estrelas e aglomerados de estrelas abrangem uma ampla faixa e dependem da posição dentro das galáxias. Por exemplo, a idade da população predominante é de cerca de 5–10 Myr, com tendência para as estrelas mais jovens serem localizadas nas proximidades de forte absorção de poeira. No entanto, populações estelares com idade de 100 e 500 Myr, respectivamente, também foram descobertas, o último presumivelmente se origina a partir do momento do primeiro encontro dessas duas galáxias, o que levou à ejeção das caudas de maré. Este parece ser um fenômeno comum, por exemplo, na galáxia starburst Arp 220 também encontra-se aglomerados estelares com uma população jovem com idade de 10<sup>7</sup> anos, bem como aglomerados mais velhos com idade  $\sim 3 \times 10^8$  anos. Parece, portanto, que durante o processo de fusão várias explosões massivas de aglomerados estelares são acionados.

Estudando as propriedades das galáxias formadoras de estrelas em baixos redshift, e quantificando a quantidade e localização da formação de estrelas no universo local, são



Figura 1.7: As galáxias Antena. À esquerda, as cores ópticas "verdadeiras" são mostradas, enquanto na imagem à direita a cor avermelhada mostra a emissão de H $\alpha$ . Este par de galáxias em fusão está formando um enorme número de estrelas jovens. Tanto a emissão UV (azulada na imagem da esquerda) quanto a radiação H $\alpha$  (avermelhada na imagem da direita) são consideradas indicadores de formação de estrelas. Os pontos individuais brilhantes de emissão não são estrelas únicas, mas aglomerados de estrelas com  $10^5 M_{\odot}$  no entanto, também é possível ver estrelas individuais (supergigantes vermelhas e azuis) nessas galáxias. (Schneider, 2015).

passos necessários para compreensão da formação e evolução das galáxias. A formação estelar pode fornecer um teste crucial para os modelos de formação e evolução de galáxias. Esses modelos agora são capazes de reunir cosmologia, matéria, gás e estrelas e fazer previsões definitivas para as propriedades da atual população de galáxias e sua evolução (Kauffmann et al., 1993). Conjuntos de dados substanciais foram reunidos nos últimos anos, porém ainda à muito a ser explorado a cerca dos fenômenos estelares nas galáxias (Gallego et al., 1995).

O fenômeno Starburst ainda não é bem compreendido, galáxias Starburst são galáxias que enfrentam processos de grande perturbação, e muitas são observadas em sistemas em interação, ou fusão. Essas galaxias possuem varias regiões de formação estelar jovem na região central ( $\approx 1 \text{Kpc}$ ), esse fenômeno é de intensa importância para estudar a evolução de estrelas massivas, do comportamento do gás, silicatos e processos físicos associados aos estágios iniciais da formação das estruturas galácticas. Nas galáxias Starburst o gás é consumido rapidamente devido aos surtos de formação estelar, galáxias com essas ca-



racterísticas o período de formação de estrelas jovens é sustido por um curto período de tempo.

*Figura 1.8:* Espectros de 4 galáxias Starburst normalizadas ordenadas de acordo com suas formas de um espectro stepeer (topo) a um mais plano (inferior). Algumas linhas de emissão também são identificadas, representadas pelas galáxias N3310, N7714, N1614 e N34. Algumas linhas de emissão também são identificadas, (Ho, 2008).

A distribuição espectral de energia (SED, do inglês "spectral energy distribution") de uma Starburts é caracterizada pelo contínuo estelar integrado de estrelas, sendo assim, em geral sua SED é o resultado da superposição de estrelas. Também, é possível que todas as galáxias passam por uma fase de formação estelar intensa em algum momento de sua vida (Gallego et al., 1995; Conselice, 2000). Efeitos de poeira e metalicidade, e talvez funções de massa inicial não padronizadas (IMFs), são em grande parte responsáveis pelas diferenças observacionais entre galáxias que passam por grandes quantidades de formação estelar. A poeira é um constituinte importante de starbursts, e é o processo dominante para alterar suas estruturas observáveis e distribuições espectrais de energia (Calzetti, 1997).

A metalicidade também pode alterar as propriedades observáveis das galáxias Star-

burst, embora as medições atuais indiquem que as galáxias com alto redshift têm metalicidades semelhantes a muitas Starbursts locais (Conselice, 2000). No entanto, estas medições são difíceis e permanecem incertas mesmo para as poucas galáxias estudadas. Galáxias com alto redshift o mecanismo responsável por disparar o fenômeno Starburst é provavelmente processos de interação entre as galáxias, as colisões podem levar à fusão das galáxias, ou a formação de caudas de maré Quando duas galáxias ricas em gás se encontram desencadeiam choque entre os gases, criando as condições ideais para a formação estelar (Conselice, 2000).

#### 1.4 Galáxias com núcleo ativo

AGNs são galáxias cujo o núcleo emite uma enorme quantidade de energia com espectro não térmico (não estelar). Um AGN é uma região compacta no centro de uma galáxia que tem uma luminosidade muito maior do que o normal em pelo menos uma parte do espectro eletromagnético com características que indicam que a luminosidade não é produzida por estrelas. Esse excesso de emissão não estelar foi observado nas bandas de ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, óptico, ultravioleta, raios-X e raios gama. Uma galáxia que hospeda um AGN é chamada de "galáxia ativa". A radiação não estelar de um AGN é teorizada como resultado do acreção de matéria por um Buraco negro supermassivo (SMBH, do inglês "supermassive black hole") no centro de sua galáxia hospedeira.

Os AGNs estão entre as fontes mais luminosas de radiação eletromagnética no universo e podem ser usados como meio de descobrir objetos distantes, o mais conhecido representante de AGNs são os quasares que são uma classe de AGN de alta luminosidade (Schmidt, 1963), objetos tipicamente em alto redshift e com propriedades exóticas. Seu espectro mostra fortes linhas de emissão que pode ser extremamente amplas usando o redshif consegue-se medir a largura das linhas as regiões BLRs contam com uma largura relativa de  $\Delta\lambda/\lambda \sim$ 0,03. A largura da linha é causada por velocidades aleatórias muito altas do gás que emite essas linhas: se interpretamos a largura da linha como devido ao alargamento Doppler resultante da superposição de linhas de emissão de gás com uma distribuição de velocidade muito ampla, obtemos velocidades tipicamente  $\Delta v \sim 10000$  km/s, ver figura 1.9. Apenas com o telescópio espacial Hubble (HST) os astrônomos conseguiram detectar estrutura na emissão óptica para uma grande amostra de quasares.


Figura 1.9: O quasar PKS 2349 está localizado no centro de uma galáxia. Os picos de difração (padrão de difração causado pela suspensão do espelho secundário do telescópio) o centro da galáxia contém uma fonte pontual, o quasar real, que é significativamente mais brilhante do que sua galáxia hospedeira. A galáxia mostra sinais claros de distorção, visíveis como caudas de maré grandes e finas. As caudas são causadas por uma galáxia vizinha que é visível na imagem da direita, logo acima do quasar; é aproximadamente do tamanho da Grande Nuvem de Magalhães. Galáxias hospedeiras de quasares são frequentemente distorcidas ou estão em processo de fusão com outras galáxias. As duas imagens mostradas aqui diferem em seu contraste de brilho, Schneider (2006).

Estabelecer que a fonte de energia dos quasares não é a aniquilação de matéria com antimatéria, como se pensava inicialmente, mas antes o acréscimo de gás levou diretamente às estimativas atuais das massas. Em contraste com as estrelas, que têm uma geometria simples, existem vários componentes de origem em AGNs com configurações geométricas diferentes, às vezes muito complexas para produzir os vários componentes do espectro; isso é esboçado na figura 1.10. Discos e jatos de acreção em AGNs são indicadores claros de um desvio significativo da simetria esférica nestas fontes. A relação entre os componentes de origem e o correspondente componentes espectrais nem sempre é óbvio. No entanto, combinando argumentos teóricos com observações levou a modelos bastante satisfatórios, levando assim a um modelo unificado para AGNs.

Segundo Machado et al. (2015), a luminosidade dos AGNs variam de  $9 \le M_B \le 30$  e  $10^{38} \le L_X \le 10^{48}$  erg  $s^{-1}$ , AGNs estão associados a presença de linhas de recombinação do hidrogênio intensas e alargadas em seu espectro de emissão devido a energia emitida pelo seu núcleo. Existem dois tipos básicos de AGN, *rádio quiets* e *radio louds*. Para



*Figura 1.10:* Contínuo típico de AGNs, os traços contínuo e tracejado representam as "Radiolouds" e as "Radio-quiets", respectivamente. Em pontilhado temos o contínuo de uma galáxia normal (tipo Sbc) (Peterson, 1997).

cada tipo de AGN há uma faixa de luminosidade intrínseca, e a luminosidade controla algumas propriedades como as classes de Fanaroff-Riley, no entanto já descartado por muitos motivos, Antonucci (1993) propõe uma nova maneira de interpretar os diferentes padrões observados nos AGNs.

### 1.4.1 Galáxias LINERs

Regiões Nucleares de Linhas de Emissão de Baixa Ionização (LINERs, do inglês "Low Ionization Nuclear Emission-Line Regions") estes objetos são os AGNs menos luminosos e mais comuns no universo, cerca de  $10^{39} - 10^{42}$  erg/s, essa classe de objetos aparece em cerca de 1/3 das galáxias do universo próximo e a classificação da fonte de ionização desses objetos ainda é um problema em aberto no campo da astronomia extragaláctica. O núcleo dessas galáxias é caracterizado por linhas de emissão com baixa ionização, como [OII] $\lambda$ 3727 e [OI] $\lambda$  6300 essas galáxias foram classificadas por Heckman (1980) ao analisar uma amostra de 88 galáxias usando telescópios no rádio e no óptico. As galáxias LINERs são definidas pelos diagramas BPT e WHAN, no diagrama BPT fase-se uso dos seguintes critérios:

- ([OIII] $\lambda$ 5007/H $\beta$ ) <3.
- ([OI] $\lambda 6300/H\alpha$ ) >0.05.
- $([SII\lambda 6716 + \lambda 6731/H\alpha) > 0.4.$
- $([NII]\lambda 6583/H\alpha) > 0.5.$

A fonte de ionização desses objetos ainda é alvo de muito debate, e diferentes mecanismos têm sido apresentados, Heckman (1980) propôs que o processo de ionização das galáxias LINERs se dava por meio de ondas de choque. Já em 1983, Halpern e Steiner (1983) e Ferland e Netzer (1983) sugeriram que as LINERs seriam ionizadas a partir de um AGN, sendo as LINERs e as galáxias Seyferts o mesmo fenômeno, entretanto, em escalas diferentes. As falhas dos modelos originais de fotoionização podem ser resolvidos pela inclusão de reações de transferência de carga Butler et al. (1980) que aumentam significamente as taxas efetivas de recombinação.

## 1.4.2 Galáxias de Seyfert

No começo do século XX o astrônomo E.A. Farth analisava o espectro de uma Nebulosa chamada NGC 1068 e observou que essa Nebulosa apresentava linhas de emissão muito mais alargadas do que quando comparadas com as de outras Nebulosas naquela época não se tinha certeza da existência de outras galaxias além da via láctea, e objetos que se assemelhavam a nuvens eram denominados de Nebulosas, hoje sabemos que muitas delas são na verdade outras galáxias. Em 1943 o astrônomo Carl Seyfert percebeu que havia diversas galáxias com propriedades semelhantes aos objetos estudados por Farth em 1908, a partir de então, Seyfert definiu um grupo de galáxias que apresentavam diferentes aspectos daqueles observados nas galáxias ditas normais, criando assim uma classificação entre galáxias ativas e galáxias normais.

As galáxias Seyfert pertence à classe das galáxias ativas e podem ser subdivididas em Seyfert do tipo 1 (Sy 1) e Seyfert do tipo 2 (Sy 2), Seyfert (1943b) foi quem primeiro veio a perceber que existem múltiplas galáxias que exibem linhas de emissão intensas e que elas podem ser classificadas em duas categoria: (i) às (Sy 1) que Manifestam linhas largas (até 8500 km s<sup>-1</sup>), e (ii) às (Sy 1) onde as linhas de hidrogênio por vezes são mais amplas que as outras linhas. Uma característica importante dessas galáxias é fato de possuírem linhas proibidas e linhas permitidas.

Linhas permitidas e proibidas são emissões espectrais específicas de átomos ou moléculas, que ocorrem devido a transições eletrônicas permitidas ou proibidas, respectivamente. As linhas permitidas e proibidas nas galáxias são formadas principalmente nas regiões de gás ionizado, como nebulosas, onde ocorrem processos de ionização, excitação e recombinação dos átomos. Essas regiões geralmente estão associadas a estrelas jovens, supernovas ou atividade de núcleos galácticos ativos. As linhas proibidas são aquelas que ocorrem em transições eletrônicas altamente improváveis, enquanto as linhas permitidas são mais comuns e ocorrem em transições eletrônicas mais prováveis.

Khachikian e Weedman (1971) aperfeiçoaram a distinção entre as (Sy 1) e (Sy 2) baseados na larguras das linhas de emissão da seguinte maneira:

- Seyfert 1:Apresenta linhas de emissão permitidas alargadas (ex. HI, HeI, HeII; 1000 - 5000 km/s); linhas proibidas estreitas (ex. [OIII], [NeV]; aproximadamente 500 km/s).
- Seyfert 2: Apresenta tanto as linhas permitidas quanto as proibidas estreitas (~ 500 km/s). O contínuo das (Sy 2) é primorosamente mais fraco do que o das (Sy 1). Quando observado em luz polarizada, as (Sy 2) também apresentam tanto linhas permitidas quanto largas (Miller e Antonucci, 1983).

Osterbrock (1981) criou mais três novas subclasses para às Seyferts que são baseadas apenas na aparência do espectro óptico, são estas:

- Seyfert 1.9: A única linha de emissão que apresenta alargamento é a de Hα, já as linhas proibidas de Balmer de ordem superior não apresentam alargamento..
- Seyfert 1.8: As linhas largas são fracas, no entanto são detectáveis tanto em Hα quanto em Hβ.
- Seyfert 1.5: A intensidade das linhas largas e estreitas de H $\beta$  são equiparáveis.

Seyfert 1.5, 1.8 e 1.9, são chamadas de tipo intermediário pois apresentam linhas permitidas largas e estreitas. As Seyferts de tipo 1 e 1.5 são fortes fontes emissoras de raios-X,



*Figura 1.11*: Espectros típicos de galáxias de Seyfert 1 e 2 e de uma galáxia "normal" como a nossa própria Galáxia. O espectro das galáxias de Seyfert é formado por linhas intensas: largas e estreitas no caso das (Sy 1), e unicamente estreitas no caso das (Sy 2).

possuindo um espectro na forma de lei de potência com índice de  $\Gamma \sim 1,9$  e corte em  $\sim 200$  keV. Nas Seyferts de tipo 2 a emissão dos raios-X é absorvida pelo HI, o índice espectral é  $\Gamma \sim 1.75$  e o corte no espectro é cerca de 130 KeV.

## 1.4.3 Modelo Unificado de AGNs

A radiação proveniente da região nuclear das galáxias ativas envolve processos físicos que são muito mais energéticos do que aqueles advindos das galáxias normais, Woltjer (1959) foi o primeiro a propor uma solução para a natureza dramática dos AGNs, para isso ele supôs que a existência da matéria que constitui o núcleo estava em interação gravitacional, e estimou a massa no núcleo em  $M \ge 10^9 M_{\odot}$ , assumindo que naquela região o teorema do virial pudesse ser aplicado e usando as medidas de dispersão de velocidades detectadas nas componentes largas das linhas de emissão das galáxias Seyfer. Observando que as várias classes de AGNs compartilhavam características em comum, foi proposto que a fonte de energia desses objetos fosse exatamente a mesma.

Essa ideia ficou conhecida como Modelo Unificado de AGNs sugerido por Miller e Antonucci (1983), esse modelo sugere que a radiação da fonte central das galáxias seja proveniente da acreção de matéria por um SMBH ativo (onde sua dimensão é menor que o valor dado pelo raio de Schwarzschild,  $r_s \equiv 2\text{GM}/c^2$ ), com massa de  $M \geq 10^8 M_{\odot}$ , o modelo de unificação propõe ainda que o SMBH e a região em torno do disco de acreção, que é conhecida como região de linhas largas (BLR, do inglês "*Broad Line Region*") estão envolvidas por um toroide de poeira e que as classes de AGNs são resultados da observação do toroide por ângulos de visada diferentes.

O modelo de unificação ainda propõe que as linhas de emissão alargadas que estão nos espectros dos AGNs seriam produzidas na BLR, por nuvens de gás em alta densidade  $(n_e \sim 10^{11} cm^{-3})$ , com temperaturas típicas de 20000 K. Por outro lado, as linhas de emissão estreitas seriam geradas na chamada região de linhas estreitas (BLR, do inglês "Narrow Line Region") com densidades tipicas de  $(n_e \sim 10^3 cm^{-3})$  que é responsável tanto por emissão de linhas proibidas como das linhas permitidas, que possui larguras em torno de 200-1000  $kms^{-1}$ , na fig. ?? podemos ver uma ilustração do Modelo unificado.

O modelo unificado de AGNs fundamenta-se em três hipóteses fundamentais:

- 1. Alguns objetos são inerentemente mais brilhantes;
- 2. Alguns objetos formam jatos de partículas relativísticas;
- A direção dos objetos é aleatória e, dependendo do ponto de visada do observador, diferentes regiões do núcleo são observadas, e os núcleos ativos galácticos são anisotrópicos (Barthel, 1989).

A subdivisão dos AGNs pelo Modelo unificado pode ser sintetizada em duas classes de objeto (excluindo os blazares):

- TIPO 1: Quando vistos em ângulos próximos ao eixo polar, *face-on*, visualizamos diretamente a região central (BLR) e também a (NLR), o que assinala um AGN de tipo 1;
- 2. TIPO 2: se observamos a estrutura toroidal em ângulos de visada próximos ao plano



*Figura 1.12*: Esquema do Modelo Unificado de AGNs. Em cinza com manchas vermelhas, se encontra o torus molecular ao redor do SMBH central. Em vermelho, o disco de acreção circundante e os jatos perpendiculares, em amarelo. São indicadas as localizações da BLR e NLR, bem como a direção do observador para identificar os objetos. Fonte: Adaptada de Zier e Biermann (2002).

equatorial do toroide, *edge-on*, a (BLR) está obscurecida pelo toroide e vemos apenas a (NLR), o que classifica esses objetos como AGNs de tipo 2.

Além da orientação, há um outro parâmetro que diferencia também os AGNs, que é sua luminosidade, que é resultante da taxa de acreção. Desta forma, os LINERs são AGNs que acretam matéria a uma taxa muito baixa, e por isto são pouco luminosos, enquanto que os Quasares são mais luminosos devido a uma maior taxa de acresção, e as galáxias Seyfert seriam casos intermediários entre estes dois extremos.

Evidências da presença de discos de gás em rotação nos núcleos ativos têm sido encontradas em diferentes bandas espectrais e a diferentes distâncias ao buraco negro. Um outro critério que da embasamento para a existência de um SMBH é a conversão de matéria em energia no entorno de um buraco negro, tem uma eficiência muito maior do que as reações nucleares nas estrelas, chegando a 10%, ou seja, 10% da massa que está sendo "engolida" é convertida em energia (contra 0.7% nas reações nucleares).

# 1.5 Diagramas Diagnósticos no Óptico - BPT e WHAN

Os diagramas diagnósticos utilizando-se de linhas de emissão constituem um importante artefato no estudo da evolução de galáxias, esquemas de classificação bidimensionais considerando relações de linha de emissão como seus eixos são ferramentas poderosas para sondar a natureza das fontes de ionização e de excitação em galáxias. Esses diagramas de diagnósticos são capazes de separar os objetos com base na dureza de seus espectros da intensidade de suas relações de linha, colocando a emissão nebular do gás fotoionizado por estrelas quentes ao longo de um locus diferente do diagrama do que o gás fotoionizado pela atividade de um SMBH. Os diagramas também podem separar os AGN que apresentam altos níveis de ionização (como Seyferts) daqueles que apresentam níveis relativamente baixos de ionização (como LINERs). há também regiões do diagrama que pode conter objetos com fotoionização de formação estelar e não estelar, sabendo que os mecanismos de excitação prevalecente nas galáxias são:

- Fotoionização por estrelas do tipo O ou B, que ocorrem nas regiões de formação estelar;
- 2. Fotoionização pelo contínuo em forma de lei de potência, originado no AGN;
- 3. Aquecimento por ondas de choque;
- 4. Fotoionização por nebulosas planetárias.

A maioria dos diagramas diagnósticos que utilizam linhas de emissão são baseados no diagrama BPT desenvolvido por (Baldwin, J. A. ; Phillips, M. M. ; Terlevich, R.)(Baldwin et al., 1981), onde galáxias são classificadas como *star forming* puras abaixo do limite de Kauffmann et al. (2003), e como AGNs puros acima do limite de Kewley et al. (2001). Objetos entre estas duas fronteiras são classificados como galáxias compostas, possuindo emissão devido a formação estelar e núcleo ativo ao mesmo tempo. Posteriormente foi definido um novo limite para separar os *star forming* dos AGNs. Há diversos diagramas de diagnóstico desenvolvidos na literatura, um dos trabalhos pioneiros nesta direção foi o diagrama de Baldwin et al. (1981).

Galáxias com intensa formação estelar e os AGNs possuem diferentes características espectrais, as regiões de formação estelar são aquecidas por estrelas devido a energia térmica, já nos AGNs a energia é devido a região central que possui um contínuo produzido pelo disco de acreção próximo do SMBH, emitindo uma energia de origem não térmica, para distinguir os diferentes fenômenos faze-se uso dos diagramas diagnósticos que são baseados nas intensidades relativas de linhas espectrais de [OIII] $\lambda$ 5007/ H<sub> $\beta$ </sub>, [NII] $\lambda$ 6583/ H<sub> $\alpha$ </sub>, [SII]  $\lambda$ 6716,  $\lambda$ 6731/ H<sub> $\alpha$ </sub> e [OI]  $\lambda$ 6300/ H<sub> $\alpha$ </sub> foram propostas para distinguir AGNs de galáxias com surto de formação estelar (Baldwin et al., 1981; Veilleux e Osterbrock, 1987).

As linhas propostas por Kewley et al. (2001) apresentam uma "linha máxima de explosão estelar" para cada diagrama de diagnóstico padrão. Eles são determinados pelo limite superior dos modelos teóricos de fotoionização estelar pura, portanto, galáxias situadas acima dessas linhas em cada diagrama provavelmente terão suas fontes de energia dominadas por um AGN, o modelo teórico adotado por Kewley et al. (2001) é expressado pelas eq. [1.3-1.5]. Com esse estudo concluiu-se que esquemas de classificação LINER incluem não apenas LINERs genuínos, mas também objetos compostos com características starburst e Seyfert.

$$log\left(\frac{[O_{III}]}{H\beta}\right) = \left(\frac{0.61}{log([N_{II}]/H\alpha) - 0.47}\right) + 1.19,\tag{1.1}$$

$$log\left(\frac{[O_{III}]}{H\beta}\right) = \left(\frac{0.72}{log([S_{II}]/H\alpha) - 0.32}\right) + 1.30, \tag{1.2}$$

$$log\left(\frac{[O_{III}]}{H\beta}\right) = \left(\frac{0.73}{log([O_I]/H\alpha) + 0.59}\right) + 1.33.$$
(1.3)

Com base na distribuição dos dados no diagrama BPT, Kauffmann et al. (2003) sugere uma revisão da demarcação entre galáxias starburst e AGNs com a seguinte expressão:

$$log\left(\frac{[O_{III}]}{H\beta}\right) = \left(\frac{0.61}{log([N_{II}]/H\alpha) - 0.05}\right) + 1.30.$$
(1.4)

As figuras 1.13 e ?? apresentam exemplos de diagramas de diagnósticos BPT dividindo regiões onde são populadas por galáxias do tipo Seyfert, LINERs, HII e objetos de transição.



Figura 1.13: Três diagramas BPT usados para classificar as galáxias de linha de emissão como: Galáxias Seyfert, LINER, Compostas e Ambíguas. Esquerda: linha tracejada mostra critérios de seleção de Kauffmann et al. (2003a), a classificação de Kewley et al. (2006) é apresentada como a linha contínua. O diagrama do meio e da direita: as linhas sólidas separam as galáxias formadoras de estrelas das galáxias ativas e as linhas tracejadas representam a demarcação Seyfert-LINER, (Kauffmann et al., 2003).



*Figura 1.14:* Diagrama BPT de linhas de emissão para distinguir AGNs de regiões HII (formação estelar intensa), As linhas contínuas separando Seyferts, objetos de transição e LINERs das Galáxias starbursts.

Um outro sistema de classificação empregado para distinguir os mecanismos de excitação dos objetos extragalácticos é o diagrama WHAN, Cid Fernandes et al. (2011), apresentaram um diagrama de diagnóstico mais econômico, pois empregam apenas informações das linhas de emissão de  $H_{\alpha}$  e do [NII], conhecido por **diagrama WHAN**, o foco principal do trabalho de Cid Fernandes et al. (2011) é incluir galáxias que mostram razões de linha fracas para ter um censo demográfico de galáxias mais completo. Este diagrama combina a largura equivalente de  $H_{\alpha}$  (WH<sub> $\alpha$ </sub>) e a relação de linha [NII]/ $H_{\alpha}$ , a largura equivalente do  $H_{\alpha}$  para assim classificar a(s) fonte(s) de ionização em galáxias, a (WH<sub> $\alpha$ </sub>) é dada por:

$$W_{H_{\alpha}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( 1 - \frac{F_{\lambda,L}}{F_{\lambda,C}} \right) d\lambda \tag{1.5}$$

onde  $F_{\lambda,L}$  e  $F_{\lambda,C}$  são os fluxos por unidade de comprimento de onda da linha e o contínuo e  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são limites arbitrários definidos para 6555Å e 6575Å, respectivamente. A principal vantagem do diagrama WHAN sobre aqueles baseados apenas em razões de linha, por exemplo, Baldwin et al. (1981); Veilleux e Osterbrock (1987) é que ele pode identificar galáxias aposentadas (Stasińska et al., 2015), o que em outros diagramas diagnósticos essas galáxias pode erroneamente ser classificadas como AGNs.

Segundo Cid Fernandes et al. (2011), quatro classes de galáxias podem ser identificadas usando o diagrama WHAN (figura 1.15):

- 1. Galáxias Starbrust (SF): log([N II]/H<sub> $\alpha$ </sub>) < -0.4 e W H<sub> $\alpha$ </sub> > 0.5 Å;
- 2. AGNs fortes (sAGN):  $\log([NII]/H_{\alpha}) > -0.4 \text{ e WH}_{\alpha} > 0.8 \text{ Å};$
- 3. AGNs fracos (wAGN):  $\log([NII]/H_{\alpha}) > -0, 4 \ge 0.5 \text{ Å} < WH_{\alpha} < 0.8 \text{ Å};$
- 4. LINERs (galáxias aposentadas)(RG): WH<sub> $\alpha$ </sub> < 0.5 Å.

O esquema de classificação proposto por Cid Fernandes et al. (2011) não traz novas linhas divisórias, mas apenas transposições das fronteiras já propostas. as curvas de Kauffmann et al. (2003), Kewley et al. (2001), e Stasińska et al. (2015) para distinguir galáxias formadoras de estrelas de AGNs, e as linhas retas de Kewley et al. (2001) para distinguir entre Seyferts e LINERs, uma linha de fronteira encontrada por Cid Fernandes et al. (2011) foi:

$$\log\left(\frac{[O_{III}]}{H\beta}\right) = 1.01 \log\left(\frac{[N_{II}]}{(H\alpha)}\right) + 0.48.$$
(1.6)



Figura 1.15: Diagrama WHAN que separa objetos extragalácticos em Star Forming (SF), sAGN (Seyferts), wAGN (LINERs), Galáxias aposentadas e Galáxias passivas. (Cid Fernandes et al., 2011).

# 1.6 Objetivos

Fazendo uso da espectroscopia de campo integral (IFS, do inglês "Integral Field Spectroscopy") pode-se realizar um estudo bidimensional do núcleo das galáxias [U]LIRGs, mapeando a cinemática e a ionização do gás buscando entender os processos físicos que são desencadeados pela presença do AGN. A emissão OHM configura uma característica importante dentro das [U]LIRGs pouco estudada dentro da literatura. A existência dessa emissão pode ser um sinal da atividade nuclear térmica em uma galáxia, e também da existência de um disco de gás circum-nuclear, análogo ao toro hipotetizado pelo modelo unificado de AGN. As galáxias com emissão OHM, ao que tudo indica, estão em um estágio crítico dentro da evolução das [U]LIRGs, onde este disco de gás circum-nuclear foi gerado recentemente. Este disco pode ser uma provável fonte de alimentação de um AGN e as galáxias OHMGs podem marcar da fase final de evolução que sinaliza o momento imediatamente antes do surgimento do AGN. Porém, como essas galáxias são pouco estudadas elas não possuem dados de alta resolução espacial disponíveis para o estudo da classificação do mecanismo de excitação, pois acredita-se que esse mecanismo possa ser a presença de AGN ou Starburst, existe na literatura um grande debate a cerca de qual é mecanismo de excitação dessas galáxias. Ás galáxias [U]LIRGs possuem grande densidade de material absorvedor circundando o SMBH impossibilitando muitas vezes a detecção de assinaturas claras da emissão não térmica do núcleo ativo em todos os comprimentos de onda, grande parte dessas galaxias sãos sistemas em interação e as observações espectroscópicas de baixa resolução integram a luz desses múltiplos núcleos, impossibilitando a classificação de cada galáxia individualmente, Assim, pretendemos com este trabalho:

- Tratar os dados espectroscópicos da OHMG IRAS 06487+22208 observados pelo Telescópio Gemini com o espectrógrafo GMOS.
- 2. Mapear a emissão e cinemática do gás ionizado.
- Elaborar diagramas BPT e WHAN para fins comparativos de razão de intensidades de linhas de emissão no intuito de identificar os mecanismos de excitação do gás.
- Construir mapas de extinção e de densidade e comparar com estudos anteriores de outras OHMGs estudadas pelo grupo.
- 5. Classificar essa galáxia dentro do cenário evolutivo.

Capítulo 1. Introdução

# Capítulo

2

# Metodologia e tratamento dos dados

Os dados utilizados neste projeto fazem parte de um estudo multi-comprimento de onda para estudar galáxias OHMGs, e tem como objetivo estudar a relação entre o estado de fusão dessas galáxias com a fase de evolução do núcleo ativo ou Starburst, e também analisar a concentração e estrutura do gás ionizado dessas galáxias. Neste projeto, foram observadas uma amostra de 15 galáxias com emissão Megamaser de OH que foram primeiramente observadas com o telescópio espacial Hubble, fazendo uso do filtro de banda larga F814W, Com estas imagens temos informação acerca da emissão contínua na banda I e da emissão gasosa. Foi feito uso do Telescópio *Very Large Array* (VLA), nas bandas X (8-10 GHz), L (1-2 GHz) e C(4–8 GHz) e também foi feito uso das linhas do maser de OH (1665/1667 MHz), foi utilizado dados espectroscópicos no óptico obtidos com o telescópio GEMINI SUL no modo IFU utilizando o instrumento GMOS. O Gemini foi construído e é operado por um consórcio internacional que inclui 7 países: Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Chile, Austrália, Brasil e Argentina, onde o Brasil tem direito a 2,31% do tempo de telescópio destinado as observações científicas.

# 2.1 Observação dos dados

## 2.1.1 Observação e tratamento dos dados de IFU obtidos pelo Gemini

O telescópio Gemini emprega uma técnica muito poderosa para estudar galáxias, a espectroscopia de campo integral, junto ao telescópio são acopladas unidades de campo integral. Nesse tipo de espectroscopia, são obtidos espectros de campos bidimensionais ao invés de uma única direção, como ocorre na espectroscopia de fenda longa por exemplo. O resultado final consiste em um cubo de dados com duas dimensões espaciais (x e y), que de

maneira geral, são dadas em termos de ascensão reta (RA) e declinação (DEC) do campo observado, e uma dimensão espectral ( $\lambda$ ).

Desse modo, cada pixel espacial da galáxia possui um espectro associado. A principal vantagem de usar IFU, é que é possível obter espectros específicos de várias regiões da galáxia simultaneamente. Isso deve-se ao fato de que as IFUs são construídas utilizando-se conjuntos de fibras óticas, logo, a imagem obtida pelo telescópio é colimada em direção às fibras e cada fibra transporta até o espectrógrafo um feixe de luz que contém apenas uma parcela da imagem original. A Figura 2.1 apresenta um esquema da obtenção de cubos de dados a partir de um conjunto de fibras óticas.

No Gemini, o principal espectrógrafo ótico é o GMOS (*Gemini Multiobject Spectro-graph*), com uma versão no Gemini Sul optimizada no azul (27% em 5700 Å com a rede B600)e no Gemini Norte optimizada no vermelho (28% em 7000 Å com a R831). No Gemini Sul é possível orientar a fenda no ângulo paralático. Os GMOS operam de 3600 Å a 9400 Å no modo de fenda longa e de multi-fendas (máscaras cortadas a laser), obtendo espectroscopia e imageamento em um campo de 5,5 minutos de arco. Cada GMOS tem também uma Unidade de Campo Integral, que pode obter espectros de uma área de 35 segundos de arco, com resolução espacial de 0,2 segundos de arco (fibras), para mais informações consultar a pagina do Gemini: https://www.gemini.edu/instrumentation/gmos.

Os dados de IFU foram obtidos pelo Observatório Gemini sul (figura 2.2), localizado no deserto do atacama, o projeto GEMINI é composto por dois telescópios idênticos, sendo o Gemini Norte (GN) localizado no Havaí e o Gemini Sul (GS) localizado no Chile. Os dois telescópios operam no modo intervalo espectral que varre desde o óptico até o IR e possuem espelhos principais de 8,1 metros de diâmetro.

Os dados espectroscópicos no óptico a cerca da galáxia Megamaser de OH IRAS 06487+2208 utilizados neste projeto, foram obtidos com o espectrógrafo GMOS (Gemini Multi-Object Spectrograph) que é acoplado ao GS. Os dados foram obtidos no modo IFU na região espectral do visível, no modo fenda única, com uma largura de fenda de 1".0, através do projeto GS-2018B-Q-203 (PI: Hekatelyne). O processo de redução e tratamento de dados são descritos a seguir. Para a redução dos dados, foi realizado uso do software IRAF (Image Reduction and Analysis Facility), foi realizada as seguintes etapas: determinação do trim da imagem, subtração de bias, divisão por flat-field, remoção de raios cósmicos, extração dos espectros, calibração em comprimento de onda, subtração do céu,



*Figura 2.1:* Figura baseada na de Mark Westmoquette, adaptada de Jeremy R. Allington-Smith, Robert Content, Roger Haynes e Ian J. Lewis, 1997, Integral field spectroscopy with the Gemini Multiobject Spectrographs, Proceedings of the SPIE (International Society for Optics and Photonics, 2871, 1284-1294, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, Editor: Arne L. Ardeberg.



Figura 2.2: Imagens do Telescópio Gemini. A esquerda vista interior, e a direita, vista exterior.

calibração em fluxo e montagem do cubo de dados com FOV 5" x 3.5", resultando em cubo formado por 39 Spaxels no eixo  $\mathbf{X}$  e 50 Spaxels no eixo  $\mathbf{Y}$ , com tamanho dos Spixels de 0.1 arscec.

#### 2.1.2 Observação e tratamento dos dados obtidos pelo HST

O Telescópio Espacial Hubble (HST, do inglês *"Hubble Space Telescope"*) é um telescópio espacial refletor que varre comprimentos de onda no ultravioleta, visível e infravermelho próximo, e foi lançado pela NASA na década de 90 a bordo do ônibus espacial Discovery. O espelho principal do HST tem 2.4 metros de diâmetro. O HST tem um tamanho total de aproximadamente 13 metros de comprimento e 4 metros de largura e uma massa de cerca de 11 toneladas.

Neste trabalho foi usado dados do HST para derivar a astrometria da OHMG IRAS 06487+2208, as imagens foram feitas com a Câmera WFPC2 (do inglês "*Wide Field and Planetary Camera 2*") O WFPC2 contém ótica corretiva interna para corrigir a aberração esférica no espelho primário do telescópio Hubble, as observações foram feitas no dia 05/11/2009, o tempo total de exposição foi de 800 segundos usando o filtro de banda larga F814W. O processamento das imagens foram feitas usando o software padrão para redução de dados astronômicos IRAF como é descrito na secção a seguir.

#### 2.1.3 Observação e tratamento dos dados obtidos pelo VLA

O VLA (do inglês, "Very Large Array") é um observatório de radioastronomia localizado na Planície de San Agustin, entre as cidades de Magdalena e Datil, a aproximadamente 80 km a oeste de Socorro, no Novo México. É um Radiotelescópio que faz parte do NRAO (do inglês, "National Radio Astronomy Observatory"), o VLA consiste em 27 antenas que são independentes, cada uma com um diâmetro de 25 metros e pesando 209 toneladas. Os diferentes arranjos do VLA permite que o radiotelescópio varra comprimentos de onda de 74 MHz até 50 GHz.

As observações em Rádio foram feitas no dia 24/01/2002 com o telescópio VLA através do programa AD461, nas bandas C(4–8 GHz/ contínuo), X(8–12 GHzGHz/ contínuo) e L(1-2 GHz/ contínuo) com espectro centrado nas linhas maser de OH em 1665 e 1667 MHz. A redução dos dados do VLA foram efetuadas por colaboradores fazendo-se uso do software CASA (do inglês, Common Astronomy Software Applications McMullin et al., 2007).

# 2.2 Tratamento dos Dados

A redução de dados espectroscópicos de IFU a cerca da galáxia IRAS 06487+2208 foi feito usando o o software IRAF e PyRAF mais os pactes de redução de dados do GMOS acoplado ao telescópio GEMINI.

Os seguintes passos foram feitos:

- Preparar os dados do GMOS para as reduções colocando as informação nos headers da imagem (neste projeto temos um FoV 5" e 3.5"). A tarefa usada foi gprepare.
- 2. Processar os dados do bias e combina-los com gbias.
- 3. Corrigir a variação fibra a fibra em todo CCD e dividir pelas imagens de flatfield normalizadas, isso foi feito com a rotina **gsflat**.
- 4. o seguinte passo foi Subtrair o overscan e bias, e dividir pelo flat, logo depois encontrar e corrigir raios cósmicos e cortar as bordas e fazer a multiplicação pelo ganho. A tarefa utilizada nesses processos foi gsreduce e que foi aplicado nos dados da galáxia, nas lâmpadas de CuAr e nos dados da estrela padrão.
- 5. Por fim é gerado os cubos de dados, com amostragem de 0.1"x0.1" foi obtido um cubo para cada exposição do objeto e o cubo é montado a partir da tarefa **gemcombine**.

# 2.3 Subtração das Populações estelares

Neste trabalho não estamos interessados em estudar a contribuição das populações estelares, logo, foi realizado a subtração das mesmas através do método PPXF (do inglês, *"Penalized PiXel Fitting"*) desenvolvido por Cappellari e Emsellem (2004); Cappellari (2017, 2022) em que usa-se ajuste de espectro total com fotometria (SED) para extrair a cinemática estelar do cubo de dados, bem como a população estelar de galáxias, com isso, é possível realizar a análise da cinemática e dinâmica do gás da galáxia.

Esta técnica também fornece medidas da cinemática estelar a partir do ajuste do espectro obtido da galáxia, o PPXF cria um espectro modelo  $G_{mod}(x)$  para a galáxia a partir da convolução de espectros templates existentes na literatura, em que esses espectros templates representam as populações estelares presentes na galáxia T(x), tendo uma distribuição de velocidades na linha de visada (LOSVD, do inglês *"Line-of-sight velocity distribution"*), o espectro modelado é então comparado com o espectro observado até que se encontre o melhor ajuste, uma vez em que o ajuste é encontrado para cada *spaxel* do cubo de dados, é feito a subtração da componente estelar do espectro observado, o espectro modelo da galáxia é dado pela equação abaixo:

$$G_{mod}(x) = \sum_{k=1}^{K} w_k [B \otimes T_k](x) + \sum_{l=0}^{L} b_l P_l(x), \qquad (2.1)$$

Em que  $w_k \ge 0$  são os diferentes pesos usados no template. Onde, B(x) = L(cx) é a função de alargamento,  $T_k$  é o k-ésimo template da base espectral,  $L(\nu)$  é o LOSVD, c é a velocidade da luz,  $\otimes$  denota a convolução,  $b_l$  são os autovalores e  $P_l$  são os polinômios de Legendre de ordem l e levam em conta as diferenças de baixa frequência na forma entre a galáxia e o modelo utilizado.

A função de  $L(\nu)$  é dada por uma série de Gauss-Hermite:

$$L(\nu) = \frac{e^{-(1/2)y^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[ 1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right]$$
(2.2)

Em que y =  $(\nu - V)/\sigma$ , V é a velocidade sistêmica,  $\nu$  é a velocidade Radial, H<sub>m</sub> são os polinômios de Hermite e h<sub>m</sub> são os momentos de Gauss-Hermite.

O PPXF foi projetado para ser independente de qualquer conjunto específico de modelos de população estelar e já foi usado com quase todos os modelos disponíveis na literatura, neste trabalho usamos a biblioteca estelar MILES modificada, usando um algoritmo de agrupamento hierárquico proposto por Vazdekis et al. (2010), as estrelas da biblioteca foram selecionadas para otimizar a cobertura dos parâmetros estelares necessários para a modelagem de síntese populacional. Outra característica importante da biblioteca é que os espectros estelares foram cuidadosamente calibrados pelo fluxo. Para isso, todas as estrelas foram observadas através de uma fenda ampla (6 segundos de arco) para evitar perdas seletivas de fluxo devido ao efeito de refração diferencial, além das configurações de maior resolução usadas para alcançar as partes azul e vermelha do espectro estelar.

# 2.4 Ajuste das linhas de emissão

Para ajustar os perfis de linhas foi usado o Software IFSCube, que é um pacote python desenvolvido por Ruschel-Dutra et al. (2021) para realizar tarefas de análise em cubos de dados de espectroscopia de campo integral, o IFSCube faz ajuste de espectros a partir de curvas gaussianas ou curvas de Gauss-Hermite, para este trabalho optamos por usar curvas Bi-Gaussianas para modelar os perfis das linhas, com isso, para cada dupla gaussiana ajustada conseguimos relacionar, através do efeito Doppler, o pico do contínuo da distribuição com a velocidade média do gás emissor, a largura da gaussiana com a dispersão e a amplitude, que junto da dispersão, nos dão o fluxo da linha devido àquele componente específico.

Assim, o código determina os componentes cinemáticos que são previamente determinados, qual o conjunto desses parâmetros melhor modela os perfis observados. Com isso consegue-se obter informações da galáxia, como, componentes cinemáticos distintos se optar por usar duas curvas Gaussianas e fazer um estudo tanto de linhas largas quanto de linhas estreitas e também fornece informações sobre as propriedades físicas médias do gás emissor.

Para isso, pode-se fazer uso de um interpretador interativo como o ipython e realizar a análise em tempo real. Durante o desenvolvimento, descobriu-se que algumas tarefas funcionam melhor como programas executáveis, em que o usuário pode chamar diretamente da linha de comando, com opções definidas por um arquivo de configuração ASCII. Essas tarefas são o ajuste de recursos espectrais em espectros 1D e cubos de dados, o ajuste de modelos de rotação a campos de velocidade e a inspeção de resultados de ajuste, são realizados pelos programas specfit, cubefit, fit-rotation e fit-scrutinizer respectivamente. O formato de dados preferido para o IFSCube é o padrão do Sistema Flexível de Transporte de Imagem (FITS).

Com o intuito de realizar um estudo detalhado sobre a distribuição de fluxo e cinemática do gás ionizado da galáxia OHMG IRAS 06487+2208, foi subtraído a componente estelar dos espectros do cubo de dados. Após feito a síntese espectral, foram construídos mapas bidimensionais e realizado a análise da distribuição de fluxo e cinemática do gás para a galáxia. Estudar o gás em galáxias é de suma importância para identificar os processos físicos que estão acontecendo nestes ambientes, sendo possível derivar parâmetros como a temperatura, densidade eletrônica, extinção do meio interstelar ou entender a dureza do campo de radiação que está presente.

Após realizarmos os processos de redução e ajuste do cubo descrito acima, plotamos o espectro de emissão da galáxia conforme podemos ver nas fig. 2.3 e 2.4, com isso foi identificado a presença tanto de linhas proibidas como linhas da série de Balmer, sendo a linha de H $\alpha$  e [NII] $\lambda$ 6583 as que possuem maior razão sinal-ruído. A Partir dos ajustes é possível construir *chanel maps* para a galáxia, identificar parâmetros físicos e construir diagramas diagnósticos e estudar efeitos de ionização da galáxia em questão, o que realizamos no próximo capitulo.

Na fig. 2.3 realizamos o ajuste do espectro da galáxia em 3 regiões distintas, no primeiro painel temos o espectro de uma região a noroeste do pico do contínuo, no segundo painel, uma região próxima ao pico do continuo e no terceiro painel em uma região a sudeste do pico do continuo, podemos ver que para as 3 regiões à variações da relação sinal/ruido, quanto mais se afasta do pico do continuo mais ruidosos ficam os Spaxels, com isso, podemos usar a relação sinal ruido como parâmetro para descartar Spaxels ruins fazendo com que nossos dados fiquem com uma precisão maior, todos os Spaxels com sigma maior que 3 foram desconsiderados ao fazer os mapas de fluxo e diagramas diagnósticos.

Usando o IFSCube foi realizado o ajuste das linhas de emissão de [OIII]  $\lambda\lambda$ 4959, 5007, H $\beta$ , He $\lambda$ 5876, [OI] $\lambda$ 6300, [NII]  $\lambda\lambda$ 6548, 6583, H $\alpha$  e [SII]  $\lambda\lambda$ 6716, 6731, os ajustes foram realizados a partir de curvas Bi-Gaussianas em todas as linhas, exceto para as de He $\lambda$ 5876 e [OI] $\lambda$ 6300 por apresentarem menor fluxo no FoV essas linhas foram bem ajustadas com apenas uma gaussiana, para as seguintes linhas foi usada a seguinte metodologia, as linhas de H $\alpha$  + [NII] foram ajustadas simultaneamente, a velocidade e a largura dessas linhas foram fixadas, a razão das intensidades I([NII]  $\lambda$ 6548)/I([NII]  $\lambda$ 6583) por sua vez, foi fixada no valor teórico de (~ 3, Osterbrock e Ferland, 2006). As linhas de [NII]  $\lambda\lambda$ 6548, 6583 são formadas pelas mesmas condições, então as mantivemos fixas. Para a linha de H $\beta$  + [OIII] foi feito o mesmo precedimento, para as linhas de [SII]  $\lambda\lambda$ 6716, 6731 ajustamos seu perfil acoplando a sua largura e sua velocidade.



*Figura 2.3:* Ajuste Bi-Gaussiano de três regiões diferentes do cubo de dados do espectro sintetizado da OHMG IRAS 06487+2208 usando IFSCube. Fonte: do autor.



Figura 2.4: Ajuste do perfil de linhas de emissão de H $\beta$  e [OIII]  $\lambda\lambda$ 4959, 5007 na primeira coluna, [OI] $\lambda$ 6300 na segunda coluna, [NII]  $\lambda\lambda$ 6548, 6583 e H $\alpha$  na terceira coluna e [SII]  $\lambda\lambda$ 6716, 6731 na quarta coluna. Para estes ajustes foi feito uso de Gaussianas duplas com exceção da linha de [OI] $\lambda$ 6300. Em linhas pontilhadas verde temos o resultado do ajuste em cada uma das componentes; em preto, o espectro ajustado; em vermelho e azul, a soma de todas as componentes ajustadas. Fonte: do autor.

Capítulo 3

# Resultados e discussões à cerca da OHMG IRAS 06487+2208

Nesta secção apresentaremos os resultados obtidos à cerca da galáxia OHMG IRAS 06487+2208, são apresentados mapas bidimensionais para o fluxo das linhas do gás emissor, velocidade radial, dispersão das velocidades, razões das linhas, densidade eletrônica, e extinção do meio interstelar a partir dos ajustes descritos no capitulo anterior. Construímos também, diagramas diagnósticos a partir das razões de linhas e do fluxo das linhas de emissão.

# 3.1 Resultados do VLA e HST

O painel superior da Figura 3.1 mostra imagens nas bandas X (8-10 GHz), L (1-2 GHz) e C(4-8 GHz) obtidos com o telescópio VLA, no painel inferior mostramos a linha maser do OH e imagens em alta resolução do Hubble na banda i ACS/HST F814W, em que vemos dois objetos brilhantes espacialmente definidos em que o objeto mais perto da região de emissão do megamaser de OH foi chamado de núcleo norte e outro objeto foi chamado de núcleo sul. A imagem da banda i revela a estrutura em interação da galáxia com os maiores fluxos observados nos dois núcleos mais com uma calda estendia em direção ao megamaser de OH as emissões na banda X concentra-se tanto na região do maser quanto na emissão do núcleo norte, de acordo com o que foi encontrado nos dados de IFU do Gemini a fonte maser encontra-se embutida em uma região de poeira. Na figura inferior de 3.1 vemos as linhas de emissão gasosa presente no espectro nuclear deste objeto, o núcleo norte apresenta um fluxo maior que o núcleo sul.



Figura 3.1: Imagem superior: Imagem fora de escala da galáxia em diferentes bandas espectrais no Rádio na parte superior, na parte inferior temos a astrometria do Maser de OH e imagem em alta resolução do Hubble em F814W. Imagem inferior: Espectro da linha de emissão de IRAS 06487+2208 obtido com o espectrógrafo GMOS/IFU observado de NW<sub> $\alpha$ </sub> e NW<sub> $\beta$ </sub>. Fonte: do autor

# 3.2 Análise de dados GMOS/IFU: Cinemática do Gás

No espectro óptico das galáxias as linhas de emissão são as principais associadas ao fenômeno AGN, a partir dessas linhas podemos obter vários parâmetros físicos do gás ionizado e fazer classificação de galáxias a partir dos perfis de linha. Neste trabalho foram mapeadas as linhas de emissão de [OIII]  $\lambda\lambda$ 4959, 5007, H $\beta$ , He $\lambda$ 5876, [OI] $\lambda$ 6300, [NII]  $\lambda\lambda$ 6548, 6583, H $\alpha$  e [SII]  $\lambda\lambda$ 6716, 6731, essas linhas foram detectadas em praticamente todo GMOS, conforme pode ser visto nas fig. 3.2 e 3.3. Os mapas de fluxo foram construídos a partir dos ajustes gaussianos dos perfis de linhas. Cada linha foi ajustada por duas gaussianas, com exceção das linhas de He $\lambda$ 5876 e [OI] $\lambda$ 6300, que foram ajustadas por uma gaussiana apenas. A parte em cinza representa os Spaxels que foram mascarados por não apresentarem uma relação sinal-ruído alta o suficiente para permitir medições das linhas de emissão ou locais onde não ouve detecção de linhas, as barras de cores representa os fluxos observados em escala logarítmica em erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-s</sup> spaxel<sup>-1</sup>.

Para as linhas estreitas, observa-se na fig. 3.2 uma emissão estendida ao longo da direção noroeste-sudeste a maioria das linhas detectadas encontram-se dentro de um limite de ~ 2 arcsec sendo H $\alpha$  e [OIII] $\lambda$ 5007 as linhas de maiores intensidade, os mapas de [OIII]  $\lambda$ 5007 e H $\alpha$  apresentam emissão estendida sobre a maior parte do campo de visão do GMOS, o mapa de fluxo da linha de H $\alpha$  obtido pelo ajuste de duas curvas gaussianas salienta a presença dos dois núcleos brilhantes que é uma característica também encontrada nas observações do HST i-band e com VLA nas bandas C, L e X. Para as demais linhas vemos um comportamento do fluxo semelhante ao de H $\alpha$  e [OIII]  $\lambda$ 5007, onde as linhas apresentam um pico de emissão de maior intensidade na parte central do FoV onde está o pico do contínuo, que é representado pela cruz preta, com exceção da linha de [SII]  $\lambda$ 6716 em que o maior fluxo está localizado a sudeste do pico do contínuo, e para a linha de [SII] $\lambda$ 6731 vemos um fluxo que se estende do centro do FoV para a região sudeste. Na fig. 3.3 temos os mapas de fluxo das linhas largas, onde se vê uma morfologia do fluxo semelhante aos das linhas estreitas porém com um fluxo menor.

Na fig. 3.4 são apresentados os mapas de velocidade para as linhas estreitas do gás da galáxia em km s<sup>-1</sup>. O campo de velocidade do gás apresenta padrões parecidos entre as linhas, apresentando *blueshifts* de aproximadamente 100 km s<sup>-1</sup> em quase todo o FoV e apresentando pequenos *redshifts* a sudeste do pico do continuo da ordem de 125 km s<sup>-1</sup>



*Figura 3.2:* Mapas bidimensionais do fluxo das linhas de emissões ópticas estreitas. O pico contínuo é representado pela cruz preta. As cores cinzas nos mapas são as regiões que mascaramos para esconder as medições ruins aplicando um corte na amplitude maior que três vezes o desvio padrão do contínuo estelar ao lado da linha. Fonte: do autor.



*Figura 3.3:* Mapas bidimensionais do fluxo das linhas de emissões ópticas largas. O pico contínuo é representado pela cruz preta. As cores cinzas nos mapas são as regiões que mascaramos para esconder as medições ruins aplicando um corte na amplitude maior que três vezes o desvio padrão do contínuo estelar ao lado da linha. Fonte: do autor.



Figura 3.4: Mapas bidimensionais da velocidade das linhas estreitas em km s<sup>-1</sup>. Fonte: do autor.



Figura 3.5: Mapas bidimensionais da velocidade das linhas largas em km s<sup>-1</sup>. Fonte: do autor.

sendo as linhas de H $\beta$  e [OIII] $\lambda$ 5007 as que apresentam na extremidade sudeste do FoV um redshift próximo a 250 km s<sup>-1</sup> e o He $\lambda$ 5876 apresentando apenas blueshift em todo o campo de velocidade. Na fig. 3.5 vemos os mapas de velocidade das linhas largas em que percebe-se que apenas a linha de [NII]  $\lambda$ 6548 possui redshift na ordem de 100 km s<sup>-1</sup> as demais linhas apresentam apenas valores para blueshift nas regiões à noroeste e valores perto de zero a sudeste do núcleo, para a linha de [NII] $\lambda$ 6583 vemos que há um blueshift total na ordem de 250 km s<sup>-1</sup> havendo uma homogeneidade em todo cubo.

Nas figuras. 3.6 e 3.7 temos os mapas de dispersão das velocidades para as linhas do gás da galáxia, na fig. 3.6 vemos a dispersão das velocidades das linhas estreitas, onde observa-se um padrão semelhante entre as linhas, a sudeste do pico do contínuo encontra-se



Figura 3.6: Mapas bidimensionais da dispersão de velocidade das linhas estreitas em km s<sup>-1</sup>. Fonte: do autor.

os maiores valores para a dispersão próximos a 200 km s<sup>-1</sup> e na região noroeste ao pico do contínuo tem-se os menores valores na ordem de 50 km s<sup>-1</sup>. Para o He $\lambda$ 5876 há uma morfologia diferente em que a leste do pico do continuo há os maiores valores e a oeste está os menores valores, para a linha de [OI] $\lambda$ 6300 vemos que tanto a sudeste quanto para uma pequena faixa estreita a oeste do pico do continuo tem-se maiores valores para dispersão . Na fig. 3.7 vê-se a dispersão para as linhas largas, onde observa-se que nas bordas do FoV estão os maiores valores para a dispersão e na região central estão os menores valores, percebe-se que tanto para as linhas largas quanto para as linhas estreitas existe um circulo homogêneo que está em volta do pico do contínuo. A linha de H $\beta_B$  apresenta dentre todas as linhas largas a menor dispersão. Na região a sudeste do pico do contínuo encontra-se as duas estruturas que são vistas com o HST o que explica os maiores valores para dispersão tendo em vista que existe um processo merger.



Figura 3.7: Mapas bidimensionais da dispersão de velocidade das linhas largas em km s<sup>-1</sup>. Fonte: do autor.

# 3.2.1 Mapas de razão entre linhas, densidade eletrônica e extinção do meio interestelar

A partir das distribuições de fluxo das linhas de emissão obtivemos os valores das razões de linhas que são usadas para verificar os mecanismos de excitação do gás como pode ser visto em 3.8 e 3.9, onde temos os mapas de razão de linhas estreitas e linhas largas respectivamente, os mapas de razão de linhas são descritos pelas razões das linhas de log([OIII]/H $\beta$ ), log([NII]/H $\alpha$ ), log([OI]/H $\alpha$ ) e log([SII] $\lambda\lambda$ 6716,6731/H $\alpha$ ), as tabelas 3.1 e 3.2 mostram os valores das razões calculadas para 2 regiões diferentes do cubo, optamos por escolher como região 1 a região do cubo onde se encontra o pico do Maser de OH e como região 2 a região que compreende os dois núcleos que são observados com o HST como pode ser visto na fig. 3.10. O mapa da razão  $\log([OIII]/H\beta_N)$  mostra os valores mais baixos ( $\leq 0,2$ ) na região sudeste ao núcleo e os valores mais altos (até 0,6) ao redor do núcleo e em uma região alongada ao leste e ao nordeste do pico do continuo, a razão de linha de log([SII] $\lambda\lambda 6716,6731/H\alpha_N$ ) apresenta menores valores ao longo de um raio de ~ 0.8 arcsec ao redor do núcleo, a razão  $\log([N \text{ II}]/H\alpha_N)$  apresenta uma homogeneidade em quase todo o mapa com uma leve declinação a sudoeste do núcleo já a razão  $\log([OI]/H\alpha_N)$ apresenta tanto valores baixos na região central como valores maiores a oeste do mapa e a leste vemos os valores intermediários.

A razões de linhas largas apresentam em  $\log([NII]/H\alpha_B)$  menores valores para região



Figura 3.8: Mapas bidimensionais da razão entre linhas estreitas. Fonte: do autor.



Figura 3.9: Mapas bidimensionais da razão entre linhas largas. Fonte: do autor.

ao norte do núcleo e maiores valores a sul do núcleo com um máximo a sudeste do pico do continuo, a razão de log([OIII]/H $\beta_B$ ) apresenta maiores valores ao longo do oeste com um faixa estendida de sul-norte, os locais com as maiores razões [NII]  $\lambda 6583/H\alpha$  são co-espaciais com os maiores valores de  $\sigma$ , isso sugere que os choques contribuem para a excitação do gás, a razão log([SII] $\lambda\lambda 6716,6731/H\alpha_B$ ) apresenta menores valores para a razão de linha ao norte do pico do continuo e maiores valores ao sudeste.

A densidade eletrônica para a galáxia IRAS 06487+2208, foi determinada a partir da razão das linhas de enxofre ([SII]  $\lambda 6716/\lambda 6731$ ), assumindo uma temperatura de 10000 K. No mapa da densidade eletrônica referente a linha estreita observamos na fig 3.11 que há uma homogeneidade na densidade com valores maiores para a região logo acima do pico do contínuo e para maiores distâncias do núcleo vemos um aumento da densidade, com valores na ordem de 3000 cm<sup>-3</sup> e para linhas largas vemos que os maiores valores estão próximos ao pico do continuo com densidade de ~ 10000 cm<sup>-3</sup>, e com menores valores ao longo de sudeste-noroeste. A densidade  $n_e$  é usado para poder caracterizar galáxias, o estudo da distribuição de densidade pode ajudar a entender a evolução dinâmica do sistema e pode ser usada para estimar a massa de gás ionizado e revelar a composição química do gás, os resultados da  $n_e$  para esta galáxia condiz com resultados de densidades observadas nos sistemas interatuantes que são interpretados como sendo devido a efeitos causados por interações das galáxias, onde ondas de choque e fluxos de gás oriundos das partes externas para as regiões centrais galácticas são produzidos.

A poeira no meio interestelar desempenha um papel crucial, influenciando a opacidade e modificando o espectro de energia. Além disso, provoca o fenômeno conhecido como avermelhamento (excesso de cor), no qual absorve e espalha a luz, re-emitindo parte dela na faixa do infravermelho. Esse efeito é mais notável em comprimentos de onda curtos, como azul, visível e ultravioleta. Aproximadamente 30% ou mais da energia estelar emitida no óptico é convertida em radiação infravermelha. Portanto, é fundamental levar em conta o impacto da poeira ao determinar as propriedades físicas nas observações.

Para derivar a extinção nas observações analisadas da OHMG IRAS06487+2208 a lei de extinção derivada por Calzetti et al. (2000); Domínguez et al. (2013) para converter o fluxo observado e intrínseco das linhas de H $\alpha$  e H $\beta$  no excesso de cor na banda B e V, E(B -V), posteriormente para derivar a extinção A<sub>V</sub>, como podemos ver na eq. [3.1] - [3.3].

$$E(B-V) = \frac{E(H\beta - H\alpha)}{f_{\lambda}(H\beta) - f_{\lambda}(H\alpha)} = \frac{2.5}{R_{\lambda}(f_{\lambda}(H\beta) - f_{\lambda}(H\alpha))} = \left[\frac{(F_{H\alpha}/F_{H\beta})^{obs}}{(F_{H\alpha}/F_{H\beta})^{int}}\right]$$
(3.1)

Onde  $f_{\lambda}(H\alpha)$  e  $f_{\lambda}(H\beta)$  são os valores da curva de avermelhamento nos comprimentos de onda H $\alpha$  e H $\beta$ , adotando  $R_{\lambda} = R_V = 3.1$  e a relação de linha teórica de  $F_{H\alpha}/F_{H\beta} =$ 2.86, assumindo uma temperatura eletrônica de  $T_e = 10~000$  K e densidade eletrônica  $n_e$ 100 cm<sup>-3</sup> (Osterbrock e Ferland, 2006), obtém-se:

$$A_V = 7.22 \log\left(\frac{(F_{H\alpha}/F_{H\beta})^{obs}}{2.86}\right) \tag{3.2}$$

logo, o fluxo intrínseco  $(f_{int}^{\lambda})$  de uma linha de emissão é relacionado com o fluxo observado  $(f_{obs}^{\lambda})$  pela seguinte equação:

$$f_{int}^{\lambda} = f_{obs}^{\lambda} 10^{0.4A_{\lambda}} = f_{obs}^{\lambda} 10^{0.4R_{\lambda}E(B-V)}$$
(3.3)

Em que,  $A_{\lambda}$  é a extinção no comprimento de onda  $\lambda$  e  $R_{\lambda}$  é o índice da curva de extinção proposta por índice de curva de Cardelli et al. (1989). Os mapas de extinção da galáxia IRAS06487+2208 podem ser vistos na fig. 3.12.



Figura 3.10: Regiões usadas para medir razões entre linhas no diagrama BPT.

Para fótons com menores comprimentos de onda a secção de choque é maior e para fótons com maiores comprimentos de onda a secção de choque é menor, isso produz o efeito de avermelhamento da radiação como podemos ver na fig. 3.12 onde a extinção de linhas estreitas tem menores valores nas bordas e tem valores maiores para a extinção na região nuclear da galáxia com um máximo a sul do pico do continuo com valores maiores para distâncias de  $\sim 1$  arcsec do núcleo, na região onde se encontra o maser de OH temos uma baixa extinção. Para as linhas largas os menores valores para a extinção esta a nordeste do pico do continuo e os maiores valores para a extinção está a noroeste do pico do continuo e  $\sim 2$  arcsec.

Tabela 3.1 - Proporções de linhas estreitas derivadas de dados GMOS/IFU

	$\log([\text{NII}]/\text{H}\alpha)$	$\log([OIII]/H\beta)$	$\log([OI]/H\alpha)$	$\log([SII]\lambda 6716 + 31/H\alpha)$
Região 1	-0.448	0.455	-1.28	-0.764
Região 2	-0.411	0.499	-1.26	-0.793

Fonte: do Autor.



Figura 3.11: Mapas de densidade eletrônica de linhas estreitas e linhas largas ([SII]  $\lambda 6716/\lambda 6731$ ).



Figura 3.12: Mapas da extinção interestelar $F_{H\alpha}/F_{H\beta}.$ 

	$\log([NII]/H\alpha)$	$\log([OIII]/H\beta)$	$\log([SII]\lambda 6716 + 31/H\alpha)$
Região 1	-0.492	0.288	-0.634
Região 2	-0.564	0.301	-0.564

Tabela 3.2 - Proporções de linhas largas derivadas de dados GMOS/IFU

Fonte: do Autor.

#### 3.2.2 Excitação do gás e diagramas diagnóstico

Neste trabalho, apresentamos pela primeira vez um estudo multi-comprimento de onda de IRAS 06487+2208. Essas imagens permitiu que identificássemos esse sistema e foi possível classificar esta galáxia como um sistema em interação composto por dois membros, sendo uma galáxia em que se tem uma transição entre starforming e AGN mas em que a formação estelar é dominante segundo os diagramas BPT.

O primeiro painel da Fig. 3.13 mostra o diagrama  $[OIII]/H\beta_N$  versus  $[NII]/H\alpha_N$  onde podemos ver que muitos Spaxels estão na região de transição a esquerda da linha de Kewley et al. (2001) e a direita do limite de Kauffmann et al. (2003), dando indícios de a excitação do gás é dominada pela atividade Starburst, mas que esta galáxia possui um SMBH que esta sendo ativado, vemos também Spaxels que estão na região de AGN forte e outros que estão na região de formação estelar e alguns poucos Spexels estão na região de AGN fraco. No segundo painel temos  $[OIII]/H\beta_N$  versus  $[SII]/H\alpha_N$ , em que quase todos os Spaxels estão a esquerda do limite de Kewley et al. (2001) com isso a os processos de excitação do gás é dominado pela formação de estrelas. No terceiro painel temos  $[OIII]/H\beta_N$  versus  $[OI]/H\alpha_N$  onde a maioria dos Spaxels estão a direita do limite de Kewley et al. (2001) com isso este processo de excitação é dominado por AGN forte.

No mapa de excitação de  $[OIII]/H\beta_N$  versus  $[NII]/H\alpha_N$  vemos que o pico do contínuo tem uma excitação que se encaixa em um objeto de transição e que conforme vai se afastando em direção as bordas a excitação passa a ser por AGN forte, sendo a oeste do pico do continuo, uma região ~ 1 arsec, onde a presença de AGN forte é maior, o segundo mapa de excitação,  $[SII]/H\alpha_N$ , apresenta valores quase todos dominados por formação estelar tendo alguns pontos na borda que apresentam ser de AGN forte. No mapa de  $[OI]/H\alpha_N$ temos um mapa com maioria dos pontos se encaixando como AGN forte e alguns pontos se encaixando como região de formação estelar, sendo uma dessas regiões logo abaixo do
pico do continuo.

Na fig. 3.14 temos o diagrama de  $[OIII]/H\beta_B$  versus  $[SII]/H\alpha_B$  onde a a maioria dos pontos do diagrama está a esquerda do limite de Kewley et al. (2001), isso indica que a formação estelar é dominante ao norte do pico do contínuo mais que o núcleo apresenta ser um objeto em transição que é dominante ao sul do pico do contínuo, e em alguns pontos da borda apresenta ter um sAGN. Para o último diagrama  $[OIII]/H\beta_B$  versus  $[OI]/H\alpha_B$  temos que a maioria dos spaxels se encontram na região de formação estelar sendo dominante para esta razão, apresentando nas bordas algumas regiões de sAGN.

Na fig. 3.15 temos diagramas e mapas de diagnóstico e de excitação para IRAS 06487+2208, onde no painel superior temos diagrama WHAN que foi proposto como uma alternativa aos diagramas BPT de Baldwin et al. (1981), e é um gráfico da largura equivalente de H $\alpha$  contra a razão de fluxo [NII]  $\lambda$ 6583/H $\alpha$ . Enquanto os diagramas BPT precisam de quatro linhas de emissão para separar as regiões ionizadas por AGN ou starburst, o diagrama WHAN requer apenas H $\alpha$  e [NII]. O diagrama WHAN permite uma separação entre starbusts, galáxias Seyfert (sAGN) e AGNs de baixa luminosidade (wAGN). Para linhas estreitas, vemos que o gás é exitado por dois modos, por formação estelar que é o processo de excitação do núcleo, e por atividade nuclear de AGN forte que tem concentração nas bordas do FoV sendo o processo de excitação dominante a leste do pico do contínuo. Para linhas largas também temos dois processos de excitação, por formação estelar e sAGN, onde vemos que a norte do pico do continuo temos a formação estelar como agente dominante da excitação e a sul e sudeste do núcleo a galáxia apresenta ser uma Seyfert.



*Figura 3.13*: Diagramas de diagnóstico de IRAS 06487+2208, nos três painéis temos os diagramas e mapas de excitação referente as linhas estreitas: no primeiro painel temos log[OIII]  $\lambda$ 5007/H $\beta$  versus log[NII]/H $\alpha$ , no segundo painel temos log[OIII]  $\lambda$ 5007/H $\beta$  versus log[OIII]  $\lambda$ 5007/H $\beta$  versus log[OIII]  $\lambda$ 5007/H $\beta$  versus [OI]/H $\alpha$ . As linhas pontilhadas e tracejadas representam os critérios de Kewley et al. (2001) e Kauffmann et al. (2003), respectivamente. O mapa de excitação identificando as regiões dentro do FoV apresenta mecanismos de excitação: AGN forte (Seyfert), AGN fraco (Liner), Objeto de transição (TO) e formação estelar (SF).



*Figura 3.14:* Diagramas de diagnóstico de IRAS 06487+2208, nos dois painéis temos os diagramas e mapas de excitação referente as linhas largas: no primeiro painel temos log[OIII]  $\lambda$ 5007/H $\beta$  versus log[NII]/H $\alpha$  e no segundo painel temos log[OIII]  $\lambda$ 5007//H $\beta$  versus log[ $\lambda$ 6716 +  $\lambda$ 6731]/H $\alpha$ .



Figura 3.15: Temos no mapa superior e inferior a esquerda, o diagrama WHAN Cid Fernandes et al. (2011) para IRAS 06487+2208. Cada ponto corresponde a um spaxel individual do cubo de dados IFU, neste diagrama são usadas as relações de linhas  $\log(EW_{H\alpha})$  VS  $\log([NII]/H\alpha)$ . Na direita superior e inferior temos mapas de excitação identificando as regiões dentro do campo de visão correspondente a diferentes mecanismos de excitação: AGN forte (sAGN), AGN fraco (wAGN), formação estelar (SF) e galáxia aposentada (Retired) e galáxias passivas.

## 3.3 A natureza da emissão nuclear e comparação com estudos anteriores

Comparamos nossos resultados a cerca de IRAS 06487+2208 com os resultados de nossos estudos semelhantes anteriores de galáxias OHM. Nos últimos anos nós realizamos uma investigação multi-comprimento do mecanismo de excitação dessas galáxias com o objetivo de relacionar o estado de fusão e as propriedades OH maser para Starburst e Atividade AGN.

No primeiro artigo publicado por Sales et al. (2015), foi realizado um estudo multicomprimento de onda da galáxia OHM IRAS 16399-0937 em que observou-se um processo de fusão intermediaria a avançada em que dois núcleos embutidos em um envelope difuso foram encontrados. Os núcleos estão a uma distância de 3.4 kpc e a distribuição de energia revelou que o núcleo norte dessa galáxia hospeda um AGN que está envolvido por poeira.

Hekatelyne et al. (2018) fizeram um segundo estudo a cerca da galáxia IRAS 23199+0123 usando dados GMOS-IFU, HST e VLA, onde detectou-se que esta galáxia é um sistema em interação separada por 24 kpc, foi detectado um núcleo tipo Seyfert 1 no membro oeste revelado pela linha de H $\alpha$ . Com dados do VLA o grupo detectou linhas do maser de OH, com isso a posição do maser foi mensurada e concluíram que as fontes masers estão correlacionadas com choques que são provocados por outflows de AGNs.

No terceiro estudo realizado por Hekatelyne et al. (2018) foi a cerca da galáxia IRAS 03056+2034, uma galáxia espiral barrada que apresenta estruturas irregulares que indica uma interação com uma companheira no passado e também foi revelado um anel circumnuclear de regiões starburst e também presença de braços espirais. O diagrama BPT e os dados do VLA indicam a presença de um AGN que está embutido no meio de regiões formadoras de estrelas ao redor do núcleo.

No quarto estudo feito por Sales et al. (2019), foi analisada a galáxia IRAS 17526+3253, em que foi descoberto um estágio intermediário de grande fusão com distâncias entre os núcleos de aproximadamente 8,5 Kpc que hospeda dois masers, um de OH e outro de H2O, durante o período de estudo dessa galáxia não houve evidências suficientes da presença de AGN.

Em um quinto estudo realizado por Hekatelyne et al. (2020) a cerca da galáxia espiral isolada IRAS 11506-3851 não foi identificado sinais de interação com outros membros, mas as observações indicam uma dupla estrutura. As regiões formadoras de estrelas são dominantes e rodeiam o núcleo dessa galaxia, a analise multicomprimento de onda os diagramas BPT e a cinemática estelar e gasosa sugerem a presença de um fraco AGN que esta imergido na região de formação estelar.

A galáxia IRAS 06487+2208 que foi o objeto de estudo deste trabalho, apresenta ser um objeto em interação em que apresenta ser uma galáxia com formação estelar mas que possui um sAGN evoluindo e que no futuro pode vir a ser a principal fonte de energia desta galáxia, de acordo com dados do GMOS-IFU, está galáxia é classificada como uma galaxia em transição formada por dois sistemas em interação em que a galáxia mais ao norte esta canibalizando a galáxia ao sul, isso pode ser verificado pelos mapas de velocidade das linhas gasosas. Nossa observação IFU foi projetada para amostrar o brilho região de toda galáxia.

Este sistema apresenta uma estrutura complexa, na maior parte do FoV, as proporções entre linhas de emissão são consistentes com fotoionização em regiões de formação estelar estimuladas por choques em que as maiores razões entre as linhas simulam fotoionização por AGN. A fonte de rádio associada a esta galáxia está centrada tanto na região de emissão maser quanto nos dois blobs, a faixa de poeira ao que tudo indica esta obscurecendo as linhas ópticas fazendo com que esses comprimentos de onda caiam no infravermelho distante.

Das 6 galáxias OHM estudadas até agora, verificou-se que o padrão que mais aparece é a presença de regiões de formação estelar, em quatro galáxias temos processos de interação envolvidos, em três delas verificou-se a presença de AGN. As outras duas galáxias são espirais e são sistemas isolados onde uma dessas galáxias apresenta irregularidades que pode estar relacionado com fusões passadas, ambas às galáxias apresentam sinais de ter AGN embutido entre as regiões de formação estelar que rodeia o núcleo.

## 3.4 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar a fonte de ionização e da cinemática da galáxia Megamaser de OH IRAS 06487+2208 fazendo uso de dados espectroscópicos no óptico no modo IFU obtidos com o GEMINI/GMOS e também imagens ópticas na banda i com HST e dados em Rádio com o VLA. Os principais resultados a cerca da galáxia são:

- Os dados de espectroscopia óptica revelam que IRAS 06487+2208 tem uma emissão estendida em todo cubo para a linha de Hα, com os mapas de velocidade vemos que a galáxia tem uma velocidade relativa ao observador muito baixa em que não apresenta um padrão de rotação.
- 2. Nos nossos estudos ficou evidente que a galáxia possui excitação de gás aprimorado.
- 3. Através dos diagramas BPT e WHAN podemos ver que os dois núcleos são regiões compostas por atividade Starburst e que as razões entre linhas são resultados de choques e que estes choques pode estar simulando fotoionização por AGNs, mas, os resultados ainda indicam que essa galáxia possui um buraco negro supermassivo ainda bebê que pode estar rodeado por poeira por apresentar uma alta extinção no núcleo como foi exposto na figura 3.12 e que no futuro pode ser a vir a fonte de excitação dominante na galáxia conforme fica evidente nos mapas de extinção da figura.
- 4. A cinemática do gás de IRAS 06487+2208 conforme visto nas figuras 3.4 e 3.5 tem complexidades apresentando perfis duplos e componentes largas típico de AGNs.
- 5. Nos nossos estudos verificou-se que a estrutura em interação da OHMG IRAS 06487+2208 está perturbando o gás dessa galáxia, fazendo com que o mecanismo Starburst seja ativado, além disso, os estudos sugerem que IRAS 06487+2208 é resultado de fusão de duas galáxias menores em que um processo de canibalização esta a ocorrer.

Como perspectivas futuras temos por objetivo obter espectro no infravermelho desta galáxia e classificá-la de acordo com os diagramas desta região do espectro e temos como objetivo também obter e analisar o espectro de outras OHMGs para ampliar nossos estudos neste campo e de melhorar nossa astrometria em relação ao GMOS/GEMINI.

## Referências Bibliográficas

- Antonucci R., Unified models for active galactic nuclei and quasars., ARA&A, 1993, vol. 31, p. 473
- Baan W. A., Haschick A. D., Henkel C., Molecular outflows in powerful OH megamasers, Astrophysical Journal, Part 1, 1989, vol. 346, p. 680
- Baan W. A., Wood P. A., Haschick A. D., Broad hydroxyl emission in IC 4553, Astrophysical Journal, Part 2 Letters to the Editor, 1982, vol. 260, p. 49
- Baldwin J. A., Phillis M. M., Terlevich R., Classification parameters for the emissoin-line spectra of extragalactic objects, Astronomical Society of the Pacific, Publications, 1981, vol. 93, p. 5
- Barthel P. D., Is every quasar beamed?, ApJ, 1989, vol. 336, p. 606
- Butler S. E., Heil T. G., Dalgarno A., Charge transfer of multiply charged ions with hydrogen and helium: quantal calculations., ApJ, 1980, vol. 241, p. 442
- Calzetti D., Reddening and Star Formation in Starburst Galaxies, AJ, 1997, vol. 113, p. 162
- Calzetti D., Armus L., Bohlin R. C., Kinney A. L., Koornneef J., Storchi-Bergmann T., The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies\*, The Astrophysical Journal, 2000, vol. 533, p. 682
- Cappellari M., Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions, MNRAS, 2017, vol. 466, p. 798

- Cappellari M., Full spectrum fitting with photometry in ppxf: non-parametric star formation history, metallicity and the quenching boundary from 3200 LEGA-C galaxies at redshift  $z \approx 0.8$ , MNRAS submitted, 2022
- Cappellari M., Emsellem E., Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood, PASP, 2004, vol. 116, p. 138
- 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., Detection of water in interestellar regions by its microwave radiation, Nature, 1969, vol. 221, p. 262
- Cid Fernandes R., Stasińska G., Mateus A., Vale Asari N., A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN?, MNRAS, 2011, vol. 413, p. 1687
- Conselice C. J., 2000 The Evolution of Starburst Galaxies
- Conselice C. J., The Evolution of Starburst Galaxies, ArXiv Astrophysics e-prints, 2000
- Darling J., A Dense Gas Trigger for OH Megamasers, ApJ, 2007, vol. 669, p. L9
- Domínguez A., Siana B., Henry A. L., Scarlata C., Bedregal A. G., Malkan M., Atek H., Ross N. R., Colbert J. W., Teplitz H. I., Rafelski M., McCarthy P., Bunker A., Hathi N. P., Dressler A., Martin C. L., Masters D., DUST EXTINCTION FROM BALMER DECREMENTS OF STAR-FORMING GALAXIES AT 0.75 [U+2A7D] z [U+2A7D] 1.5 WITH HUBBLE SPACE TELESCOPE/WIDE-FIELD-CAMERA 3 SPECTROSCOPY FROM THE WFC3 INFRARED SPECTROSCOPIC PARALLEL SURVEY, The Astrophysical Journal, 2013, vol. 763, p. 145
- Fath E. A., The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters, Lick Observatory Bulletin, 1909, vol. 149, p. 71
- Ferland G. J., Netzer H., Are there any shock-heated galaxies ?, ApJ, 1983, vol. 264, p. 105

- Gallego J., Zamorano J., Aragón-Salamanca A., Rego M., The Current Star Formation Rate of the Local Universe, The Astrophysical Journal, 1995, vol. 455
- Gardner F. F., Whiteoak J. B., The groundstate OH spectrum of the galaxy NGC 253, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1975, vol. 173, p. 77
- Halpern J. P., Steiner J. E., Low ionization active galactic nuclei : X-ray or shock heated ?, ApJ, 1983, vol. 269, p. L37
- Heckman T. M., An Optical and Radio Survey of the Nuclei of Bright Galaxies Activity in the Normal Galactic Nuclei, A&A, 1980, vol. 87, p. 152
- 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, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, vol. 479, p. 3966
- Hekatelyne C., Riffel R. A., Storchi-Bergmann T., Kharb P., Robinson A., Sales D., Cassanta C. M., The OH Megamaser galaxy IRAS11506-3851: an AGN and star formation revealed by multiwavelength observations, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, vol. 498, p. 2632
- Ho L. C., Nuclear activity in nearby galaxies., ARA&A, 2008, vol. 46, p. 475
- Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., Ridgway S. E., Brinkmann J., Fukugita M., Hall P. B., Ivezić Ž., Richards G. T., Schneider D. P., The host galaxies of active galactic nuclei, MNRAS, 2003, vol. 346, p. 1055
- Kauffmann G., Heckman T. M., White S. D. M., Charlot S., Tremonti C., Brinchmann J., Bruzual G., Peng E. W., Seibert M., Bernardi M., Blanton M., Brinkmann J., Castander F., Csábai I., Fukugita M., Ivezic Z., Munn J. A., Nichol R. C., Padmanabhan N.,

Thakar A. R., Weinberg D. H., York D., Stellar masses and star formation histories for 10<sup>5</sup> galaxies from the Sloan Digital Sky Survey, MNRAS, 2003, vol. 341, p. 33

- Kauffmann G., White S. D. M., Guiderdoni B., The formation and evolution of galaxies within merging dark matter haloes., MNRAS, 1993, vol. 264, p. 201
- Kewley L. J., Dopita M. A., Sutherland R. S., Heisler C. A., Trevena J., Theoretical Modeling of Starburst Galaxies, ApJ, 2001, vol. 556, p. 121
- Khachikian E. E., Weedman D. W., A spectroscopic study of luminous galactic nuclei., Astrofizika, 1971, vol. 7, p. 389
- Lo K. Y., Mega-Masers and Galaxies, ARA&A, 2005, vol. 43, p. 625
- Londsdale C. J., Diamond P. J., Lonsdale C. J., Smith H. E., Imaging of the ARP 220 OH Megamasers with VLBI, Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources, ASP Conference Series, 1998, vol. 144, p. 227
- Lonsdale C. J., Farrah D., Smith H. E., 2006 Ultraluminous Infrared Galaxies. p. 285
- Machado R. E. G., Monteiro-Oliveira R., Lima Neto G. B., Cypriano E. S., Simulating the shocks in the dissociative galaxy cluster Abell 1758N, MNRAS, 2015, vol. 451, p. 3309
- McMullin J. P., Waters B., Schiebel D., Young W., Golap K., CASA Architecture and Applications. In Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI, vol. 376 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2007, p. 127
- Meza A., Navarro J. F., Steinmetz M., Eke V. R., Simulations of Galaxy Formation in a ΛCDM Universe. III. The Dissipative Formation of an Elliptical Galaxy, ApJ, 2003, vol. 590, p. 619
- Miller J. S., Antonucci R. R. J., Evidence for a highly polarized continuum in the nucleus of NGC 1068, ApJ, 1983, vol. 271, p. L7
- Nguyen-Q-Rieu Mebold U., Winnberg A., Guilbert J., Booth R., OH emission an absorption in M82, 1976, vol. 52, p. 467
- Osterbrock D., Ferland G., Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei. University Science Books, 2006

- Osterbrock D. E., Seyfert galaxies with weak broad H alpha emission lines, ApJ, 1981, vol. 249, p. 462
- Osterbrock D. E., Ferland G. J., Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei, 2006
- Parra R., Conway J. E., Elitzur M., Pihlström Y. M., A compact starburst ring traced by clumpy OH megamaser emission, A&A, 2005, vol. 443, p. 383
- Peterson B. M., An Introduction to Active Galactic Nuclei. Cambridge University Press, 1997
- Reid M. J., Moran J. M., Masers., ARA&A, 1981, vol. 19, p. 231
- Ruschel-Dutra D., Storchi-Bergmann T., Schnorr-Müller A., Riffel R. A., Dall'Agnol de Oliveira B., Lena D., Robinson A., Nagar N., Elvis M., AGNIFS survey of local AGN: GMOS-IFU data and outflows in 30 sources, MNRAS, 2021, vol. 507, p. 74
- 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., 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\*, The Astrophysical Journal, 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 observation of the OH Megamaser Galaxy IRAS17526+3253, MNRAS, 2019
- 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[U+2605], Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, vol. 486, p. 3350

- 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, 1988, vol. 325, p. 74
- Schmidt M., 3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift, Nature, 1963, vol. 197, p. 1040
- Schneider P., Extragalactic Astronomy and Cosmology. Springer Berlin Heidelberg Berlin, Heidelberg, 2006
- Schneider P., Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction, 2015
- Seyfert C. K., Five thousand external galaxies and a new dense group., AJ, 1943a, vol. 53, p. 203
- Seyfert C. K., Nuclear Emission in Spiral Nebulae., ApJ, 1943b, vol. 97, p. 28
- Soifer B. T., Sandres D. B., Madore B. F., Neugebauer G., Danielson G. E., Elias J. H., Rice W. L., The IRAS bright galaxy sample. II. The sample and luminosity function, The Astrophysical Journal, 1987, vol. 320, p. 238
- Stasińska G., Costa-Duarte M. V., Vale Asari N., Cid Fernandes R., Sodré L., Retired galaxies: not to be forgotten in the quest of the star formation - AGN connection, MNRAS, 2015, vol. 449, p. 559
- S.Weinreb A. H., Radio Observations of OH in the Intersllar Medium, Nature, 1963, vol. 200, p. 483
- Vazdekis A., Sánchez-Blázquez P., Falcón-Barroso J., Cenarro A. J., Beasley M. A., Cardiel N., Gorgas J., Peletier R. F., Evolutionary stellar population synthesis with MILES I. The base models and a new line index system, MNRAS, 2010, vol. 404, p. 1639
- Veilleux S., Osterbrock D. E., Spectral classification of emission-line galaxies, ApJS, 1987, vol. 63, p. 295
- Whiteoak J. B., Gardner F. F., A 5-GHz Survey of the galactic center region with a resolution of 4 arc min, Astrophysical Letters, 1973, vol. 13, p. 205
- Woltjer L., Emission Nuclei in Galaxies., ApJ, 1959, vol. 130, p. 38

Zier C., Biermann P., Binary black holes and tori in AGN II. Can stellar winds constitute a dusty torus, A&A, 2002, vol. 396, p. 91