

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE MESTRADO EM FÍSICA

Cláudia Marzari Cassanta

**VENTOS DE GÁS IONIZADO A PARTIR DO NÚCLEO DA GALÁXIA
OH MEGAMASER IRAS 09320+6134**

Santa Maria, RS
2023

Cláudia Marzari Cassanta

**VENTOS DE GÁS IONIZADO A PARTIR DO NÚCLEO DA GALÁXIA OH
MEGAMASER IRAS 09320+6134**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado em Física, Área de Concentração em Astronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Física**.

ORIENTADOR: Prof. Rogemar André Riffel

Santa Maria, RS
2023

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Cassanta, Claudia Marzari
Ventos de gás ionizado a partir do núcleo da galáxia
OH megamaser IRAS 09320+6134 / Claudia Marzari Cassanta.
2023.
68 p.; 30 cm

Orientador: Rogemar André Riffel
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Física, RS, 2023

1. IRAS 09320+6134 2. Galáxias [Ultra]luminosas no
Infravermelho 3. OH Megamaser 4. Espectroscopia IFU 5.
Outflows I. Riffel, Rogemar André II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, CLAUDIA MARZARI CASSANTA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

©2023

Todos os direitos autorais reservados a Cláudia Marzari Cassanta. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: claudia.cassanta@acad.ufsm.br

Cláudia Marzari Cassanta

**VENTOS DE GÁS IONIZADO A PARTIR DO NÚCLEO DA GALÁXIA OH
MEGAMASER IRAS 09320+6134**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado em Física, Área de Concentração em Astronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Física**.

Aprovado em 3 de março de 2023:

Rogemar André Riffel, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Guilherme dos Santos Couto, Dr. (AIP)

Jáderson da Silva Schimoia, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha avó, Clélia (in memoriam), que sempre vibrou e comemorou cada conquista minha como se fossem dela

"Em algum lugar, algo incrível está esperando para ser descoberto."

(Carl Sagan)

RESUMO

VENTOS DE GÁS IONIZADO A PARTIR DO NÚCLEO DA GALÁXIA OH MEGAMASER IRAS 09320+6134

AUTORA: Cláudia Marzari Cassanta

ORIENTADOR: Rogemar André Riffel

As galáxias [ultra]luminosas no infravermelho são objetos extremamente brilhantes nesta faixa do espectro, com luminosidades superiores a $10^{11} L_{\odot}$. Observa-se que estes objetos, que consistem tipicamente de interações e fusões de galáxias, são ambientes propícios para a emissão de megamasers de OH, luminosos e poderosos masers extragalácticos. Embora ainda não se tenha total compreensão sobre as condições físicas dos ambientes que produzem megamasers de OH, observa-se que muitos sistemas hospedeiros deste fenômeno apresentam espectro composto, tanto com características associadas à regiões de intensa formação estelar, as Starbursts, quanto com a presença de um AGN. A galáxia IRAS 09320+6134 faz parte de um projeto que tem como objetivo geral relacionar as propriedades da emissão megamaser e o estágio de fusão de sua galáxia hospedeira com possíveis atividades AGN e/ou SB, a fim de compreender melhor a natureza do mecanismo de ionização de galáxias que apresentam esse fenômeno. As observações foram realizadas no Telescópio Gemini Norte, utilizando-se o espectrógrafo GMOS no modo IFU. A IRAS 09320+6134 está no limite entre LIRG e ULIRG, com luminosidade no infravermelho estimada de $L_{IR} = 10^{11.95-12.02} L_{\odot}$. Ajustamos as linhas de emissão presentes nos espectros por séries de Gauss-Hermite, mas observamos que a cinemática do gás apresentava duas componentes, portanto fizemos um novo ajuste com duas curvas Gaussianas, uma estreita e uma larga, para representar os perfis das linhas de emissão. A partir dos ajustes, foram construídos mapas de fluxo, velocidade e dispersão de velocidade, além de diagramas de diagnóstico e mapas de razões de intensidades de linhas. As distribuições de fluxo apresentam emissão estendida em todas as linhas em ambas as componentes, com a emissão da componente estreita sendo observada em todo o campo de visão e a emissão da componente larga vista principalmente nos $1.5''$ centrais. A componente estreita está traçando a emissão do gás no disco da galáxia e os campos de velocidade dessa componente mostram um disco em rotação, com amplitudes de até $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$. Por outro lado, a componente larga, vista em *blueshift* em relação à componente estreita, apresenta velocidades negativas de até $\sim -800 \text{ km s}^{-1}$ e é interpretada como sendo devido a um *outflow* de gás ionizado proveniente do núcleo da galáxia. Os diagramas de diagnóstico BPT e WHAN para ambas as componentes indicam que a ionização é predominantemente devido à presença de um AGN. Estimativas preliminares das propriedades do *outflow* indicam que sua potência cinética é cerca de 2 ordens de grandeza menor do que os valores estimados por simulações cosmológicas para que o *feedback* de AGN seja eficiente em suprimir a formação estelar. Por fim, apresentamos também um panorama geral com resultados preliminares para outras 6 galáxias da amostra, cujos resultados ainda não foram publicados. Todos os objetos apresentam emissão estendida nas linhas de emissão mais intensas e uma componente de disco em rotação. Ademais, todos os objetos apresentam movimentos não circulares que não podem ser representados somente por uma componente de disco em rotação, que serão melhores analisados em um trabalho futuro.

Palavras-chave: IRAS 09320+6134. Galáxias [Ultra]luminosas no Infravermelho. OH Megamaser. Espectroscopia IFU. Outflows.

ABSTRACT

IONIZED GAS WINDS FROM THE NUCLEUS OF OH MEGAMASER GALAXY IRAS 09320+6134

AUTHOR: Cláudia Marzari Cassanta

ADVISOR: Rogemar André Riffel

[Ultra]luminous infrared galaxies are extremely bright objects in this spectrum range, with luminosities bigger than $10^{11} L_{\odot}$. It is observed that these objects, which typically consist of interactions and mergers of galaxies, are propitious environments for the emission of OH megamasers, luminous and powerful extragalactic masers. Although there is still no complete understanding of the physical conditions of the environments that produce OH megamasers, it is observed that many host systems of this phenomenon present a composite spectrum, both with characteristics associated with regions of intense star formation, the Starbursts, and with the presence of an AGN. The galaxy IRAS 09320+6134 is part of a project whose general objective is to relate the properties of the megamaser emission and the merger stage of its host galaxy with possible AGN and/or SB activities, in order to better understand the nature of the ionization mechanism of galaxies that present this phenomenon. The observations were performed on the Gemini North telescope, using the GMOS spectrograph, in IFU mode. IRAS 09320+6134 is on the boundary between LIRG and ULIRG, with an estimated infrared luminosity of $L_{IR} = 10^{11.95-12.02} L_{\odot}$. We adjusted the emission lines present in the spectra by Gauss-Hermite series, however we observed that the gas kinematics had two components, so we made a new adjustment with two Gaussian curves, one narrow and one broad, to represent the profiles of the emission lines. From the adjustments, maps of flux, velocity and velocity dispersion were constructed, in addition to diagnostic diagrams and line intensity ratio maps. The flux distributions show extended emission in all lines in both components, with the emission of the narrow component being observed in the whole field of view and the emission of the broad component seen mainly in the central $1.5''$. The narrow component is tracing gas emission in the galaxy's disk, and the velocity fields of this component show a rotating disk, with amplitudes up to $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$. On the other hand, the broad component, seen in blueshift in relation to the narrow component, presents negative velocities of up to $\sim -800 \text{ km s}^{-1}$ and is interpreted as being due to an outflow of ionized gas from the galaxy's nucleus. The BPT and WHAN diagnostic diagrams for both components indicate that the ionization is predominantly due to the presence of an AGN. Preliminary estimates of the outflow properties indicate that its kinetic power is around 2 orders of magnitude less than the values estimated by cosmological simulations for the AGN feedback to be efficient in suppressing star formation. Finally, we also present an overview with preliminary results for another six galaxies of the sample, whose results have not been published yet. All objects show extended emission in the most intense emission lines and a rotating disk component. Furthermore, all objects present non-circular movements that cannot be represented by a rotating disk component alone, which will be better analyzed in a future work.

Keywords: IRAS09320+6134. [Ultra]luminous Infrared Galaxies. OH Megamaser. IFU spectroscopy. Outflows.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema de classificação de galáxias do Hubble	9
Figura 1.2 – Aglomerado de galáxias SMACS 0723	10
Figura 1.3 – Galáxia ULIRG Arp 220	12
Figura 1.4 – Galáxias Antena	16
Figura 1.5 – Diagrama ilustrando o processo de emissão estimulada	18
Figura 2.1 – Satélite IRAS	23
Figura 2.2 – Observação de todo o céu obtida com o satélite IRAS	24
Figura 2.3 – Imagem da galáxia IRAS 09320+6134 feita com o Telescópio Espacial Hub- ble	26
Figura 2.4 – Telescópio Gemini Norte	27
Figura 2.5 – Espectro de uma lâmpada de CuAr.	32
Figura 2.6 – Espectro da estrela padrão Feige 66.	32
Figura 2.7 – Esquematização de um cubo de dados	33
Figura 3.1 – Espectro nuclear da galáxia IRAS 093320+6134	35
Figura 3.2 – Espectro da galáxia IRAS 093320+6134 em região distante do núcleo, a no- roeste	36
Figura 3.3 – Exemplos de ajustes por séries de Gauss-Hermite para o spaxel nuclear e um spaxel a $\sim 1.75''$ para oeste do núcleo	38
Figura 3.4 – Exemplos de ajustes por curvas Gaussianas para o spaxel nuclear e um spaxel a $\sim 1.75''$ para oeste do núcleo	40
Figura 3.5 – Diagrama dos níveis de energia da configuração fundamental $3p^3$ do [S II] ..	41
Figura 3.6 – Curva de dependência de $[S II]\lambda 6716/6731$ em função da densidade eletrô- nica para uma temperatura $T_e = 10000$ K	41
Figura 4.1 – Panorama geral de ajustes por séries de Gauss-Hermite de outras 6 galáxias da amostra	47
Figura 4.2 – Mapas das distribuições de fluxo, dos campos de velocidade, das dispersões de velocidade e dos momentos h_3 e h_4 , obtidos pelo ajuste de séries de Gauss- Hermite	50
Figura 4.3 – Distribuições de fluxo obtidos por ajustes de curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão presentes nos espectros	52
Figura 4.4 – Mapas dos campos de velocidade obtidos por ajustes de curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão presentes nos espectros	53
Figura 4.5 – Mapas das dispersões de velocidade obtidos por ajustes de curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão presentes nos espectros	54
Figura 4.6 – Mapas de razões de intensidades de linhas de emissão para as componentes estreita e larga	55
Figura 4.7 – Mapas de densidade eletrônica para as componentes estreita e larga	56
Figura 5.1 – Diagrama BPT para a componente estreita das linhas	58
Figura 5.2 – Diagramas WHAN para a componente estreita e para a componente larga ..	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	GALÁXIAS (ULTRA)LUMINOSAS NO INFRAVERMELHO	12
1.1.1	Galáxias com Núcleo Ativo	13
1.1.1.1	<i>Galáxias Seyfert</i>	14
1.1.1.2	<i>Quasares</i>	14
1.1.1.3	<i>Radiogaláxias</i>	15
1.1.1.4	<i>LINERs</i>	15
1.1.2	Galáxias Starburst	16
1.2	EMISSÃO MASER	17
1.3	MEGAMASERS DE OH	19
1.4	CONTEXTO E OBJETIVOS DO TRABALHO	20
2	OBSERVAÇÕES, AMOSTRA E REDUÇÃO DE DADOS	23
2.1	O PROJETO IRAS	23
2.2	A AMOSTRA E A GALÁXIA IRAS 09320+6134	25
2.3	OBTENÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS	27
2.3.1	O instrumento GMOS	28
2.3.2	Observações	29
2.3.3	Redução de dados astronômicos	29
3	METODOLOGIA	35
3.1	DISTRIBUIÇÃO E CINEMÁTICA DO GÁS	36
3.1.1	Ajustes por séries de Gauss-Hermite	37
3.1.2	Ajustes com curvas Gaussianas	39
3.2	DENSIDADE ELETRÔNICA	39
3.3	MECANISMOS DE EXCITAÇÃO DO GÁS	42
3.3.1	Diagrama de diagnóstico BPT	42
3.3.2	Diagrama de diagnóstico WHAN	43
4	RESULTADOS	45
4.1	ESTRUTURA DE EMISSÃO E CINEMÁTICA DO GÁS PARA TODAS AS GALÁXIAS	45
4.2	IRAS 09320+6134: DISTRIBUIÇÃO E CINEMÁTICA DO GÁS	48
4.2.1	Ajustes por séries de Gauss-Hermite	48
4.2.2	Ajustes por curvas Gaussianas	50
4.3	MAPAS DE RAZÕES DE INTENSIDADES DE LINHAS DE EMISSÃO	54
5	DISCUSSÕES	57
5.1	MECANISMO DE EXCITAÇÃO DO GÁS	57
5.1.1	Diagrama de diagnóstico BPT	57
5.1.2	Diagramas de diagnóstico WHAN	57
5.2	OUTFLOW	59
5.3	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS ANTERIORES	61
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
6.1	CONCLUSÕES	63
6.2	PERSPECTIVAS	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

As galáxias são imensas ilhas cósmicas de estrelas, poeira, gás e matéria escura mantidos unidos pela gravidade. Acredita-se que haja pelo menos uma quantia da ordem de bilhões a trilhões destes objetos no Universo. Existem galáxias dos mais variados tamanhos e formatos, e elas podem ser classificadas a depender de como as estrelas, a poeira e o gás interestelar que as constituem se distribuem para formá-las.

Edwin Hubble (1926) propôs um sistema de classificação baseado em uma série de características morfológicas destes objetos. Há as galáxias elípticas (E), caracterizadas por sua aparência elipsoide e por apresentarem uma distribuição de brilho suave; há também as galáxias espirais (S), nas quais podemos distinguir a presença de um disco e um bojo, além da existência de modestos ou majestosos braços espirais; há as galáxias lenticulares, vistas como uma fase intermediária entre galáxias elípticas e espirais, que possuem bojo e uma espécie de disco, mas não apresentam braços espirais; e por fim, há ainda as galáxias irregulares, que apresentam ausência de simetria. As galáxias espirais, lenticulares e irregulares podem ou não serem dotadas de barras (B), que são estruturas lineares que cruzam o núcleo. O sistema de Hubble é mostrado na Figura 1.1.

Hoje em dia, a classificação de galáxias proposta por Hubble ainda é aceita, mas foi revisada e adaptada para incluir uma série de particularidades, como o formato dos braços espirais, a quantidade de braços espirais, a ocorrência de anéis ou barras nucleares, entre outros.

Figura 1.1 – Esquema de classificação de galáxias do Hubble.



Fonte: John Kormendy (Editado pela autora)

As galáxias podem ser encontradas isoladas no Universo, em pequenos grupos ou aglomerados e ainda em aglomerados de aglomerados, os superaglomerados. Nós mesmos, com a

nossa Via Láctea, fazemos parte de um grupo com algumas dezenas de outras galáxias, o chamado Grupo Local. Outro exemplo de aglomerado é o SMACS 0723, a cerca de 4.24 bilhões de anos-luz¹ de distância. Ele já havia sido observado algumas vezes pelo Telescópio Espacial Hubble e já fazia parte da vasta galeria de imagens mais bonitas do nosso Universo, mas em julho de 2022 fomos agraciados com uma imagem ainda mais incrível deste aglomerado, uma das primeiras feitas a partir de observações com o Telescópio Espacial James Webb, e mostrada na Figura 1.2. É a imagem no infravermelho mais profunda e nítida do Universo distante obtida até hoje.

Figura 1.2 – Aglomerado de galáxias SMACS 0723, a cerca de 4.2 bilhões de anos-luz de distância. A massa combinada desse aglomerado atua como uma lente gravitacional, distorcendo e ampliando galáxias mais distantes, algumas das quais datadas de quando o Universo tinha menos de um bilhão de anos.



Fonte: NASA, ESA, CSA e STScI

¹O ano-luz é uma unidade de distância e corresponde à distância percorrida pela luz em um ano, no valor de 9.46×10^{12} km.

Além de juntarem-se em grupos e aglomerados, as galáxias também podem interagir entre si conforme passam perto umas das outras, podendo, inclusive, colidirem e se fundirem, dependendo da força dessa interação. Essas fusões e interações de galáxias são bastante comuns em aglomerados, onde as galáxias encontram-se geralmente a apenas algumas dezenas de megaparsecs² de distância entre si, mas também ocorreram bastante no Universo no passado, quando as galáxias como um todo encontravam-se mais próximas umas das outras.

Alguns fatores importantes e determinantes do tipo de interação que ocorrerá dizem respeito à massa das galáxias em questão, se são semelhantes ou uma é muito mais massiva do que a outra, à velocidade relativa das galáxias e à maneira como elas passarão uma pela outra, isto é, se ambas irão esbarrar de frente uma com a outra, ou uma de frente e a outra de perfil, ou ambas de perfil, entre outras orientações relativas. Além disso, estima-se que o processo completo de interação entre duas galáxias pode levar cerca de alguns milhões até bilhões de anos. Considerando a estrutura das galáxias, acredita-se que sua componente mais externa seja um halo de matéria escura. Quando ocorre uma interação, os halos de matéria escura das galáxias colidem, produzindo um arrasto conhecido como fricção dinâmica, desacelerando as galáxias e causando alterações em seu formato. As estrelas presentes em uma dessas galáxias podem sentir uma força gravitacional de maré da outra, de modo que a galáxia tem sua estrutura deformada, muitas vezes formando grandes caudas de estrelas. Além disso, durante o processo de interação ou fusão, nuvens de gás presentes nos discos das galáxias são comprimidas pelas forças de maré, podendo desencadear surtos de formação estelar. Conforme a interação prossegue, eventualmente os núcleos das duas galáxias se fundem em uma única galáxia (PALMA, 2020).

Para o caso de duas galáxias de massa semelhante e com baixas velocidades relativas passando perto ou através uma da outra, ocorre uma fusão. Em um cenário semelhante, mas com as galáxias movendo-se rapidamente, com altas velocidades relativas, é pouco provável que ocorra uma fusão, pois a força de fricção dinâmica entre elas não será grande o suficiente para desacelerá-las a ponto de permitir a fusão. Nesse caso, a perturbação na estrutura das galáxias é pouca, como a remoção de algumas estrelas mais externas fracamente ligadas gravitacionalmente à sua galáxia hospedeira. Há ainda outro cenário, no caso de uma galáxia muito mais massiva do que a outra, onde ocorre o que chamamos de canibalismo galáctico. Como o nome sugere, nesse processo a galáxia mais massiva absorve por completo a galáxia de menor massa, sem que seja muito afetada (PALMA, 2020).

Por demorarem tanto tempo para ocorrer e principalmente por muitas vezes modificarem consideravelmente a estrutura das galáxias, as fusões e interações entre galáxias são uma referência importante para o estudo da evolução desses objetos. Nesse âmbito, um importante exemplo de objetos que consistem geralmente de fusões e interações de galáxias são as galáxias luminosas no infravermelho.

²O parsec (pc) é uma unidade de distância bastante utilizada na Astronomia e equivale a cerca de 3.086×10^{13} km.

1.1 GALÁXIAS (ULTRA)LUMINOSAS NO INFRAVERMELHO

Uma das mais importantes descobertas das observações extragalácticas nos comprimentos de onda do infravermelho médio e distante foi a identificação das galáxias luminosas e ultraluminosas no infravermelho ([U]LIRG - [*Ultra*]Luminous Infrared Galaxy), objetos que emitem mais energia no infravermelho do que em todos os outros comprimentos de onda combinados (SANDERS; MIRABEL, 1996). As [U]LIRGs estão, de fato, entre os objetos mais luminosos do Universo, exibindo luminosidades no infravermelho acima de $10^{11} L_{\odot}$, para o caso das LIRGs, e acima de $10^{12} L_{\odot}$, para o caso das ULIRGs.

O interesse em pesquisar esse tipo de objetos cresceu e vem crescendo significativamente, principalmente porque as [U]LIRGs não são tão raras no Universo, diferente do que se imaginava e do que se encontrava no Universo local. Na verdade, elas são centenas de vezes mais numerosas em altos *redshifts*, da ordem de $z > 1$, do que no Universo local. Isso sugere que elas desempenharam um papel bastante importante na formação e evolução das galáxias e, portanto, compreendê-las torna-se de suma importância (LONSDALE; FARRAH; SMITH, 2006). A Figura 1.3 mostra a galáxia Arp 220, a ULIRG mais próxima da Terra e resultado de uma colisão entre duas galáxias espirais que estão ainda em processo de fusão.

Figura 1.3 – Galáxia ULIRG Arp 220.



Acredita-se que as ULIRGs foram descobertas e observadas pela primeira vez em grande parte pelo satélite IRAS, em 1983. A maioria, se não todas, foram vistas como grandes fusões de disco, onde as centenas de parsecs centrais das regiões nucleares abrigavam massas muito grandes de gás e poeira (LONSDALE; FARRAH; SMITH, 2006). Altas concentrações de poeira são, de fato, encontradas em ambientes de interação e fusões de galáxias e podem explicar em parte, mas não completamente, a alta luminosidade das [U]LIRGs no infravermelho. Considerando que as [U]LIRGs possuem populações de estrelas jovens e quentes em rápida formação, estas, por sua vez, liberam radiação ultravioleta, que é absorvida pelas grandes quantidades de poeira nessas regiões de formação estelar e reemitida como energia térmica, visível no infravermelho (RUJOPAKARN et al., 2010).

Ao que tudo indica, fortes interações e fusões de galáxias espirais ricas em gás molecular são as responsáveis por formarem a maioria das [U]LIRGs. Sanders et al. (1988) apresentam imagens de ULIRGs que indicam fortemente que a luminosidade infravermelha máxima nestes objetos ocorre próxima ao momento em que os dois núcleos de fato se fundem. Na faixa de $L_{IR} = 10^{11-12} L_{\odot}$, isto é, para as LIRGs, estudos mostram um aumento significativo na frequência de sistemas fortemente interativos e extremamente ricos em gás molecular; na extremidade inferior dessa faixa, a luminosidade parece ser dominada por Starbursts e na extremidade superior, os AGNs, mais especificamente as Seyferts, têm um papel maior na luminosidade. Para $L_{IR} > 10^{12} L_{\odot}$, ou seja, para as ULIRGs, revelam-se grandes concentrações centrais de gás molecular e poeira, onde esta última acaba por obscurecer bastante a região central, de modo que torna-se difícil distinguir a contribuição de atividade Starburst ou AGN, porém as condições mostram-se favoráveis para ambos, inclusive com a possibilidade de coexistência (SANDERS; MIRABEL, 1996).

As regiões compactas que emitem no infravermelho nas ULIRGs sugere duas possíveis origens para a alta luminosidade destes objetos no infravermelho: a existência de regiões compactas de intensa formação estelar, isto é, Starbursts, nas redondezas do núcleo da galáxia e/ou a existência de um núcleo ativo de galáxia obscurecido por poeira. Muitos esforços foram feitos para determinar quais destes dois fenômenos era o responsável pelo intenso brilho das ULIRGs, contudo, tem-se observado que AGNs e Starbursts podem ser encontrados juntos, coexistindo, nestes objetos, mas ainda procura-se determinar qual dos dois mecanismos é dominante e também entender a relação da coexistência de ambos nas ULIRGs (LONSDALE; FARRAH; SMITH, 2006).

1.1.1 Galáxias com Núcleo Ativo

As galáxias tendem a apresentar uma grande concentração de estrelas na sua região central, que, por conseguinte, acaba ficando bem mais brilhante se comparada ao restante da galáxia. Essa radiação é majoritariamente emitida na região do ótico do espectro. Contudo, em

algumas galáxias o núcleo é muito mais brilhante do que o usual, muitas vezes mais luminoso do que o restante da galáxia e com rápidas flutuações em intensidade, e não apenas nos comprimentos de onda do ótico, mas também em ultravioleta, rádio e raios X. Essa radiação não pode ser explicada apenas pela energia térmica advinda das estrelas, ou seja, a fonte dessa radiação é não estelar. Estas galáxias, cuja região central emite quantidades excepcionais de energia, com espectro não térmico, são chamadas de galáxias ativas e seu núcleo é chamado de núcleo ativo de galáxia (AGN - *Active Galactic Nucleus*).

Em 1964, Edwin Salpeter e Yakov Zel'dovich propõem que a fonte de energia das galáxias com núcleo ativo origina-se a partir de gás sendo acelerado por um buraco negro supermassivo, de cerca de milhões de massas solares, no centro da galáxia (SALPETER, 1964; ZEL'DOVICH, 1964). O gás nas proximidades do buraco negro cai em direção a ele, formando um disco de acreção em rotação com raio de alguns dias-luz a semanas-luz. Conforme este gás espirala para o centro, energia gravitacional é convertida em energia cinética, acelerando, aquecendo e liberando enormes quantidades de energia. Simultaneamente, parte desse gás pode ser ejetada a altas velocidades em direção perpendicular ao disco de acreção, formando os jatos e lóbulos observados em muitas galáxias ativas.

Existem vários tipos de galáxias ativas, classificadas principalmente em relação à sua luminosidade, à técnica observacional com que foram detectadas, às características de seu espectro e ainda à orientação em relação à linha de visada.

1.1.1.1 Galáxias Seyfert

As galáxias Seyfert foram o primeiro tipo de AGN a ser detectado. Descobertas e descritas por Carl Seyfert em 1943, esses objetos são identificados, geralmente, como galáxias espirais com um núcleo pontual extremamente brilhante e cujos espectros mostram linhas de emissão intensas e de alta ionização. Elas são classificadas de acordo com a presença ou não de linhas de emissão largas em seu espectro nuclear, podendo ser Seyfert do tipo 1 (Sy 1) e Seyfert do tipo 2 (Sy 2). As galáxias Seyfert do tipo 1 apresentam linhas de emissão largas ($\sigma \gtrsim 1000 \text{ km s}^{-1}$) e estreitas ($\sigma \lesssim 500 \text{ km s}^{-1}$), e as galáxias Seyfert do tipo 2, por sua vez, apresentam apenas linhas de emissão estreitas em seu espectro nuclear (SCHNEIDER, 2014).

1.1.1.2 Quasares

Os quasares foram descobertos por volta de 1960, como fortes fontes de rádio. Seu nome vem de *Quasi Stellar Radio Source*, que significa fonte de rádio quase estelar, pois, de fato, esses objetos possuem uma aparência ótica aproximadamente estelar, de cor azulada, quando observados com telescópios terrestres de pequeno e médio porte. Além disso, eles são extremamente

compactos e luminosos, podendo emitir mais do que centenas de galáxias juntas e o motivo de terem sido descartados como estrelas foi o de possuírem forte emissão em rádio. Seus espectros caracterizam-se por apresentarem linhas de emissão largas com enormes *redshifts*, o que indica que estes objetos estão muito distantes e se afastam mais ainda, a velocidades bastante altas, de até alguns décimos da velocidade da luz (OLIVEIRA; SARAIVA, 2013).

1.1.1.3 Radiogaláxias

As radiogaláxias são um tipo de AGN com extensas regiões emissoras de rádio, com potência em torno de 10^{40} a 10^{45} erg s^{-1} . Quando observadas no ótico, geralmente esses objetos consistem em grandes galáxias elípticas, mas, quando observadas em rádio, é possível perceber uma estrutura dupla, com dois lóbulos emissores em rádio, localizados um em cada lado da galáxia e a distâncias que chegam a até 6 Mpc de seu centro. Também é possível observar jatos de matéria saindo do núcleo desses objetos, entendidos como partículas carregadas se movendo em um campo magnético (OLIVEIRA; SARAIVA, 2013). Da mesma forma que para as galáxias Seyfert, também distinguimos as radiogaláxias de acordo com a presença ou não de linhas de emissão largas nos espectros, de modo a termos as radiogaláxias com linhas largas (BLRG - *broad-line radio galaxy*) e as radiogaláxias com linhas estreitas (NLRG - *narrow-line radio galaxy*). Além dessa classificação ótica quanto às linhas de emissão, as radiogaláxias também são distinguidas de acordo com sua morfologia em rádio, com fontes de rádio divididas em FR I (*Fanaroff–Riley Type I*) e FR II (*Fanaroff–Riley Type II*), cuja diferença está no formato do brilho: radiogaláxias do tipo FR I são mais brilhantes próximas ao núcleo e o brilho superficial diminui do núcleo para o exterior e radiogaláxias do tipo FR II, por outro lado, possuem um brilho superficial que aumenta do núcleo para o exterior e são, em geral, mais luminosas do que as FR I (SCHNEIDER, 2014).

1.1.1.4 LINERs

Os LINERs, cujo nome vem de *Low-Ionization Nuclear Emission line Region*, são o tipo menos luminoso de AGNs, com luminosidade de cerca de 10^{39} a 10^{42} erg s^{-1} , e consistem em regiões de linhas de emissão nuclear de baixa ionização, como $[O II]\lambda 3727$ e $[O I]\lambda 6300$ por exemplo. Além disso, a largura das linhas de emissão nesses objetos é tipicamente menor do que as linhas de emissão estreitas das galáxias Seyfert, contudo, em alguns LINERs pode-se encontrar linhas de emissão largas (SCHNEIDER, 2014).

1.1.2 Galáxias Starburst

Seja pelo tipo espectral, pela idade ou pela quantidade, as estrelas de uma galáxia fornecem assinaturas observacionais que nos permitem inferir sobre características e informações a respeito da história e evolução de sua galáxia hospedeira. Do mesmo modo, a taxa de formação estelar de uma galáxia também diz muito sobre ela.

Quando uma galáxia passa por uma fase excepcionalmente intensa de formação estelar, ela pode ser classificada como uma Starburst. Contudo, vale destacar que uma galáxia Starburst não é uma classe propriamente dita, mas sim uma fase evolutiva na vida de uma galáxia. A atividade Starburst, isto é, a alta taxa de formação estelar, pode ocorrer espalhada por toda a galáxia, para o caso de galáxias anãs principalmente, ou ainda concentrada em um pequeno volume, frequentemente na região circumnuclear, para galáxias mais massivas. As razões para que ocorra essa explosão de formação estelar ainda é debatida, mas algumas hipóteses são as interações entre galáxias: desde uma passagem próxima até uma fusão completa podem estimular esses ambientes (KABATH; JONES; SKARKA, 2020). As galáxias Antena, na Figura 1.4, são um famoso exemplo de Starburst, onde duas galáxias espirais que colidiram, e estão ainda hoje em interação, propiciaram este ambiente turbulento de gás e poeira colidindo e formando novas estrelas a uma taxa bastante elevada.

Figura 1.4 – Galáxias Antena, par de galáxias em interação com intensa atividade Starburst.



As taxas de formação estelar em galáxias Starburst estão tipicamente entre 10 e 300 M_{\odot} por ano, cerca de 100 vezes mais do que a nossa Via Láctea, que possui uma taxa de formação estelar inferior a 2 M_{\odot} por ano. As galáxias Starburst são frequentemente bastante luminosas no infravermelho, emitindo cerca de 98% da sua luminosidade nesta faixa do espectro. Isto ocorre por causa da grande quantidade de poeira presente nestes ambientes, onde a poeira absorve grande parte da radiação ultravioleta produzida pelas estrelas massivas na região de formação estelar, é aquecida por essa radiação e reemite essa energia na forma de radiação térmica na faixa do infravermelho (SCHNEIDER, 2014).

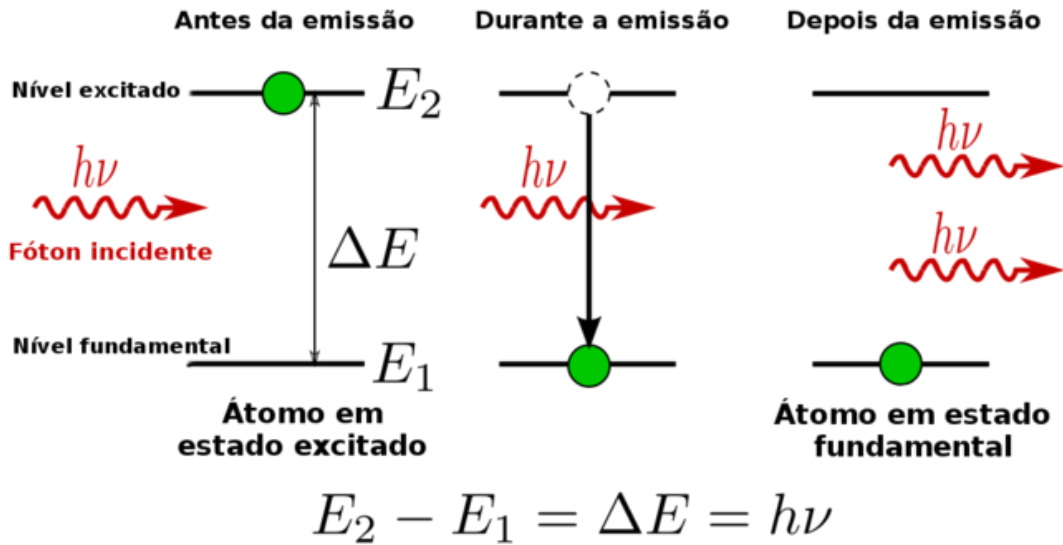
Para que novas estrelas se formem, é necessário haver uma grande quantidade de gás e poeira disponíveis. O acúmulo de gás na região central de galáxias Starburst pode servir de combustível para outro fenômeno: o núcleo ativo de galáxia. De fato, atividades AGN e Starbursts têm sido encontradas coexistindo em diversas galáxias, mas ainda é uma questão em debate se esta coexistência é apenas coincidência ou se há uma relação causal (KABATH; JONES; SKARKA, 2020).

1.2 EMISSÃO MASER

Em 1917, Albert Einstein, em seu artigo intitulado "*On The Quantum Theory of Radiation*" (EINSTEIN, 1917), introduziu os conceitos de emissão espontânea e emissão estimulada. Um átomo, quando em um estado excitado de energia, tende a decair para um estado de menor energia ou ao seu nível fundamental espontaneamente, após algum tempo, liberando energia na forma de um fóton, que é emitido em uma direção aleatória. Esse é o princípio básico da chamada emissão espontânea, que é, como o nome sugere, um processo espontâneo que ocorre sem estímulo externo. Paralela à emissão espontânea, existe também a emissão estimulada. Neste caso, temos um átomo em estado excitado e a incidência de um fóton nesse sistema é o que estimula o decaimento, mas nessa configuração são emitidos dois fótons com mesma frequência, mesma fase e mesma direção. A Figura 1.5 mostra um diagrama do processo de emissão estimulada.

A emissão estimulada é o princípio fundamental do laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), cujo nome significa amplificação da luz por emissão estimulada de radiação, e, da mesma forma, é o princípio fundamental do maser (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) que, por sua vez, é uma amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação. Em outras palavras, pode-se dizer que um maser age como um laser que emite micro-ondas em vez de radiação visível. A palavra maser foi usada pela primeira vez em 1954, em um trabalho do físico Charles Townes, que construiu o primeiro amplificador em micro-ondas. Este primeiro maser, no entanto, não funcionava em modo contínuo, problema este que foi corrigido pouco tempo depois por contribuições de Nikolay Basov e Aleksandr Prokhorov, e que rendeu o Prêmio Nobel aos três cientistas em 1964.

Figura 1.5 – Diagrama ilustrando o processo de emissão estimulada. Da esquerda para a direita: átomos do meio são estimulados, por radiação incidente, a um nível de energia mais alto. Essa energia é liberada na forma de radiação conforme um átomo retorna a um nível de menor energia, mais estável. A radiação liberada, por sua vez, pode continuar estimulando mais átomos, de modo a produzir a amplificação.



Fonte: Wikipedia

Os masers não ocorrem em condições normais, sob equilíbrio térmico, pois neste caso a radiação é geralmente absorvida pelo meio em que está se propagando, sendo atenuada em vez de ser amplificada. Só ocorrem, portanto, em laboratório, sob condições específicas e com equipamentos elaborados (LO, 2005). Na verdade, para que ocorra a emissão maser, é necessário que ocorra algo chamado inversão de população, que é quando um sistema possui mais átomos ou moléculas em um estado de maior energia do que em relação a um estado de menor energia. Nesta configuração, mais fótons são produzidos por emissão estimulada do que absorvidos. Contudo, um sistema deste tipo não está em equilíbrio térmico, de modo que requer condições especiais para ocorrer. Especificamente, deve haver alguma fonte de energia capaz de levar os átomos ou moléculas para um estado excitado. Uma vez que ocorre a inversão de população, um fóton com a energia correspondente à diferença de energia entre dois níveis pode produzir emissão estimulada de outro fóton de mesma energia. Neste caso, o átomo ou molécula, ao passar para um nível de menor energia, emite um fóton. Portanto, agora há dois fótons de mesma energia, mesma direção de propagação, mesma frequência e mesma fase. Com uma grande quantidade de átomos e moléculas, a repetição desse processo é o que leva à amplificação da radiação.

O meio interestelar revelou-se um verdadeiro laboratório natural para o fenômeno do maser, pois as condições de excitação são tais que certas moléculas emitem em micro-ondas. Encontrados principalmente em regiões de formação estelar e associados a estrelas evoluídas, eles fornecem informações únicas sobre o nascimento e a morte das estrelas. Além disso, por serem relativamente pequenas em tamanho angular, as fontes de maser podem ser usadas para

estudar a dispersão interestelar e para medir distâncias por métodos de trigonometria e paralaxe estatística (REID; MORAN, 1981).

1.3 MEGAMASERS DE OH

Os masers astrofísicos podem ser decorrentes da amplificação de diferentes moléculas, dentre os mais comuns destacam-se os das moléculas de hidroxila (OH), da água (H₂O), do metanol (CH₃OH) e do monóxido de silício (SiO). Em 1965, cerca de 11 anos após o primeiro maser ser construído em laboratório, foi detectado um maser de OH no plano da nossa galáxia. Nos anos seguintes, masers de outras moléculas foram descobertos na Via Láctea, incluindo masers de H₂O, SiO e CH₃OH (REID; MORAN, 1981).

A primeira evidência de emissão maser extragaláctica foi em 1973, com a detecção da molécula de hidroxila na galáxia NGC 253, cuja emissão mostrou-se dez vezes mais luminosa do que os masers galácticos (ELITZUR, 1992). Alguns anos depois, em 1982, o primeiro megamaser extragaláctico foi descoberto em uma ULIRG, a Arp 220. A luminosidade desse megamaser foi determinada em aproximadamente $10^3 L_{\odot}$, ou seja, cem milhões de vezes mais intenso do que os masers encontrados em nossa galáxia até então, dando origem, portanto, ao prefixo mega em megamaser (BAAN; WOOD; HASCHICK, 1982; BAAN; HASCHICK, 1984). As principais características de galáxias com emissão megamaser de OH (OHM), segundo Kandalian (1996), Lo (2005) e Darling e Giovanelli (2002), são:

- Ambientes ricos em gás molecular, $M_{HII} \sim 5 \times 10^9 - 5 \times 10^{10} M_{\odot}$, e com alta luminosidade no infravermelho, $L_{IR} \sim 10^{10} - 10^{13} L_{\odot}$. A região da emissão maser tem um tamanho inferior a 1 pc e a densidade do gás molecular é geralmente maior do que 10^5 cm^{-3} ;
- Possuem frequentemente altas taxas de formação estelar na região nuclear. Em geral, as condições necessárias para produzir uma emissão megamaser de OH são a presença de intensa formação estelar e atividade nuclear simultaneamente, com um forte contínuo em rádio, por isso investigar esses objetos pode contribuir para relacionar atividade e formação estelar no centro dessas galáxias;
- Têm um espectro íngreme no infravermelho no intervalo de $12 - 25 \mu\text{m}$, e um espectro plano no intervalo de $60 - 100 \mu\text{m}$. Além disso, a luminosidade isotrópica do OH é proporcional à luminosidade no infravermelho pela relação $L_{OH} \propto L_{IR}^{1.2 \pm 0.1}$;
- Os perfis das linhas de OH geralmente mostram asas largas deslocadas para o azul a partir do pico, em 1667 MHz, o que indica a presença de jatos de gás advindos da região nuclear da galáxia. A emissão também ocorre bastante na frequência de 1665 MHz;
- As luminosidades da emissão megamaser são da ordem de $10^{2-4} L_{\odot}$.

As galáxias luminosas e ultraluminosas no infravermelho são frequentemente associadas como hospedeiras do fenômeno da emissão megamaser de OH. De fato, estes ambientes de fusão e/ou interação de galáxias podem fornecer as condições para a formação de megamasers

de OH, tanto devido à alta luminosidade no infravermelho quanto pela presença de gás molecular de alta densidade nos núcleos de fusão (HUANG et al., 2018). Embora estejam associados a ambientes de fusão e interação como as [U]LIRGs, as condições físicas que produzem os megamasers de OH ainda não são bem compreendidas. Este fenômeno é frequentemente associado à atividade AGN, mas também parece exigir ambientes com grandes explosões de formação estelar, de modo a ser frequentemente associado também à atividade Starburst. Além disso, muitos sistemas hospedeiros da emissão megamaser de OH apresentam um espectro composto, ou seja, tanto com características de atividade AGN, quanto com características de atividade Starburst, o que pode indicar a presença de um AGN obscurecido por poeira e rodeado por regiões de formação estelar ou ainda a transição entre uma Starburst e a erupção de um AGN (DARLING; GIOVANELLI, 2006).

Um estudo com 40 [U]LIRGs contendo emissão megamaser de OH foi feito por Baan, Salzer e LeWinter (1998) a fim de classificar a atividade nuclear dos objetos da amostra. Os resultados obtidos foram de 18 galáxias com núcleo ativo, 13 galáxias Starburst, e ainda 9 galáxias com espectro composto, contendo atividades AGN e Starburst. Em outras palavras, considerando os objetos de espectro composto, 67.5% dos objetos da amostra foram classificados como AGN contra 55% classificados como Starburst. Além disso, foi observado que os AGNs tendem a aparecer mais quanto maior a luminosidade no infravermelho, consistente com a tendência observada em outros estudos para uma amostra geral de ULIRGs ($L_{IR} > 10^{12} L_{\odot}$) (KIM; VEILLEUX; SANDERS, 1998; VEILLEUX; SANDERS; KIM, 1999). Isso pode sugerir que a aparição do AGN e a emissão megamaser estão ligados. Considerando o elevado obscurecimento nuclear em galáxias com megamasers, também não se descarta a possibilidade de que as galáxias da amostra classificadas como sendo puramente Starbursts possam abrigar um AGN oculto, com a emissão observada podendo ser proveniente de um Starburst circumnuclear que sofre menos extinção. Ou ainda, tendo em vista que os ambientes de fusão e interação aumentam com o aumento da luminosidade no infravermelho, a disponibilidade de gás nas regiões nucleares pode ser suficiente para despertar um AGN adormecido. Uma hipótese alternativa, para ambientes em fusão em que os núcleos ainda não se fundiram, ou seja, que possuam dois núcleos separados, é de que um núcleo apresente atividade AGN e o outro atividade Starburst (BAAN; SALZER; LEWINTER, 1998).

1.4 CONTEXTO E OBJETIVOS DO TRABALHO

A galáxia IRAS 09320+6134 é uma entre 70 galáxias com emissão megamaser de OH de um amplo estudo em múltiplos comprimentos de onda cujo objetivo geral é relacionar as propriedades do megamaser de OH e o estado de fusão e interação da galáxia hospedeira às atividades Starburst e/ou AGN. Em um primeiro momento, o foco está sobre uma subamostra de 15 galáxias, dentre as quais a galáxia IRAS 09320+6134 faz parte. O projeto conta com dados

do Observatório Gemini, do Telescópio Espacial Hubble (HST – *Hubble Space Telescope*) e do *Very Large Array* (VLA), mas neste trabalho serão analisados apenas os dados obtidos com o Observatório Gemini para a galáxia IRAS 09320+6134.

De modo geral, utilizando dados de espectroscopia de campo integral, pretendemos fazer um mapeamento da distribuição e cinemática do gás na região central da galáxia, a partir do ajuste dos perfis das linhas de emissão presentes nos espectros da mesma. Este processo fornecerá os dados necessários para que possamos construir mapas de razões de linhas e diagramas de diagnóstico que, por sua vez, nos permitirão analisar os mecanismos de ionização e excitação do gás.

A cinemática e excitação do gás em seis galáxias OHM da amostra já foi estudada, sendo que os resultados para cinco delas já foram publicados e os resultados para mais uma fazem parte de um artigo em fase final de elaboração (Hekatelne et al., submetido). No primeiro artigo desta série de estudos em múltiplos comprimentos de onda, Sales et al. (2015) apresentaram um estudo da galáxia IRAS 16399-0937, caracterizada como uma fusão média a avançada, com dois núcleos embebidos em um envelope difuso e separados por uma distância de 3.4 kpc. A distribuição espectral de energia revelou que o núcleo noroeste hospeda um AGN imerso em poeira.

No segundo estudo, Hekatelne et al. (2018a) apresentaram uma análise da galáxia IRAS 23199+0123 utilizando espectros obtidos com o espectrógrafo GMOS no modo de unidade de campo integral, imagens no ótico obtidas com o Telescópio Espacial Hubble e imagens em rádio obtidas com o *Very Large Array*. O objeto IRAS 23199+0123 constitui um par em interação, cujas galáxias estão separadas por cerca de 20 kpc uma da outra. Foi detectado um núcleo Seyfert 1 no membro ocidental do par. A partir dos dados do VLA, foi possível relatar uma nova detecção de maser, determinar a posição dos masers e concluir que as fontes de masers estão correlacionadas a choques causados por *outflows* advindos do AGN.

O terceiro estudo, Hekatelne et al. (2018b), foi para a IRAS 03056+2034, uma galáxia espiral barrada com estruturas irregulares que podem indicar uma interação passada. Foi detectado um anel circumnuclear de regiões de formação estelar. Além disso, o diagrama BPT e os dados do VLA sugerem a presença de um AGN imerso entre as regiões de formação estelar ao redor do núcleo, sugerindo contribuição de ambos, AGN e Starburst, na excitação e ionização do gás desta galáxia.

O quarto estudo, Sales et al. (2019), foi sobre a galáxia IRAS 17526+3253. Esta galáxia está em uma grande fusão de estágio intermediário, com núcleos separados por uma distância de 8.5 kpc que hospedam masers de OH e de H₂O. Não há fortes evidências da presença de um AGN, embora essa possibilidade não possa ser excluída com base na análise dos dados apresentados. Contudo, foram detectadas regiões de formação estelar contribuindo na excitação do gás na galáxia.

O quinto e mais recente estudo publicado, Hekatelne et al. (2020), foi para a galáxia IRAS 11506-3851, uma espiral isolada que não mostra sinais claros de interação, mas mostra

uma estrutura de barra dupla. Foram detectadas regiões de formação estelar ao redor do núcleo. Além disso, a análise dos dados do VLA, diagramas BPT e cinemática do gás sugerem a presença de um AGN fraco imerso em uma região dominada por formação estelar, e ainda a presença de um modesto *outflow* proveniente do AGN.

Por fim, o sexto estudo, ainda em processo de publicação, foi para a galáxia IRAS 19154+2704. As imagens da galáxia obtidas com o Telescópio Espacial Hubble foram bastante irregulares, com claros sinais de interação, mas sem que se possa identificar outro objeto, de modo que a interação parece estar em um estágio avançado. Foi detectada a presença de um AGN nesta galáxia, previamente desconhecido, além de um *outflow* de gás ionizado proveniente do AGN, o mais intenso detectado nas galáxias destes estudos até então.

Em síntese, os resultados obtidos até o momento indicam a presença de AGNs em 5 das 6 galáxias OHM estudadas. Os objetos estudados apresentam diferentes estágios de fusão, desde objetos em estágios bastante avançados até objetos cujos pares estão separados por até cerca de 20 kpc, além de uma galáxia isolada. Embora o número de objetos estudados até o momento seja ainda muito pequeno para tirar conclusões definitivas acerca da origem das galáxias OHM, tem sido observado um padrão da presença de regiões de formação estelar no entorno do núcleo das galáxias, que, por sua vez, abrigam um AGN na maioria estudada até então. É necessário realizar um estudo detalhado da cinemática e excitação do gás em mais objetos para identificar a origem da emissão do gás nas galáxias OHM.

Neste trabalho, estudamos em detalhes a galáxia IRAS 09320+6134 e apresentamos resultados gerais para outras 6 galáxias, que ainda não foram tema de trabalhos anteriores como parte do projeto. Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Estudar a estrutura de emissão e cinemática do gás para 7 galáxias a partir dos ajustes das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite;
- Estudar em detalhes a estrutura de ionização e origem das linhas de emissão observadas para a galáxia IRAS 09320+6134 a partir de mapas de razões entre intensidades de linhas e diagramas de diagnóstico;
- Estudar a cinemática do gás e identificar movimentos não circulares, tais como *outflows*, para a galáxia IRAS 09320+6134, a partir de ajustes das linhas de emissão por múltiplas componentes gaussianas;
- Caracterizar as propriedades dos *outflows* na galáxia IRAS 09320+6134, tais como taxa de ejeção de massa e potência cinética, e verificar se os mesmos são capazes de afetar a formação estelar da galáxia, a partir da comparação das propriedades observadas com modelos teóricos.

2 OBSERVAÇÕES, AMOSTRA E REDUÇÃO DE DADOS

2.1 O PROJETO IRAS

Lançado em janeiro de 1983, o satélite IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*), projeto em conjunto dos Estados Unidos (NASA - *National Aeronautics and Space Administration*), do Reino Unido (SERC - *Science and Engineering Research Council*) e dos Países Baixos (NIVR - *Netherlands Agency for Aerospace Programmes*), foi a primeira missão espacial com o objetivo de mapear todo o céu na faixa de comprimentos de onda do infravermelho. Ele mapeou 96% do céu quatro vezes, em 12, 25, 60 e 100 μm , com resoluções desde 30'' em 12 μm até 2' em 100 μm . A Figura 2.1 mostra uma concepção artística do telescópio em órbita da Terra.

Figura 2.1 – Concepção artística do telescópio IRAS em órbita da Terra.

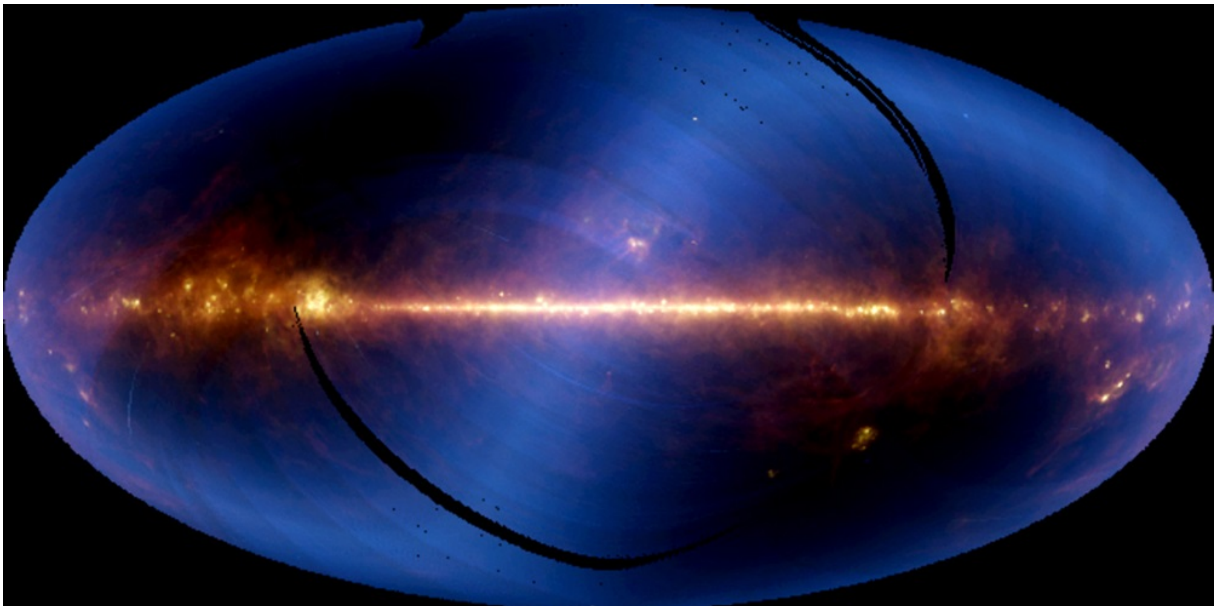


Fonte: NASA/JPL

O satélite levava a bordo um telescópio do tipo Ritchey-Chrétien de 57 cm de diâmetro, cujo plano focal continha um arranjo de 62 detectores infravermelhos. Além disso, ele também continha um espectrômetro de baixa resolução (LRS - *Low Resolution Spectrometer*), para os comprimentos de onda de 12 e 25 μm , e um fotômetro (CPC - *Chopped Photometric Channel*), para os comprimentos de onda de 50 e 100 μm . IRAS detectou cerca de 350000 fontes no infravermelho, incluindo seis novos cometas, evidências de grãos de poeira ao redor de estrelas,

como Vega, e as imagens mais profundas do núcleo da nossa Via Láctea obtidas até aquela época, e aumentou o número total de fontes astronômicas no infravermelho catalogadas em cerca de 70%. A Figura 2.2 é uma junção das observações de todo o céu feitas pelo IRAS nos primeiros 6 meses de operação, em três dos quatro comprimentos de onda: 12, 60 e 100 μm . A faixa horizontal brilhante é o plano da Via Láctea, com o centro da galáxia localizado no centro da imagem.

Figura 2.2 – Observação de todo o céu obtida com o satélite IRAS nos comprimentos de onda de 12, 60 e 100 μm . O material mais quente aparece em azul ou branco e o mais frio em vermelho ou amarelo. A faixa horizontal brilhante é o plano da Via Láctea e podemos identificar alguns objetos celestes como a Grande Nuvem de Magalhães (ponto relativamente isolado abaixo do plano, à direita do centro) e regiões de formação estelar nas constelações de Ophiuchus (diretamente acima do centro galáctico) e Órion (os dois pontos mais brilhantes abaixo do plano, à direita). As listras pretas são regiões do céu que não foram escaneadas pelo telescópio em seus primeiros 6 meses de operação.



Fonte: NASA/JPL-Caltech

Para funcionarem efetivamente no domínio do infravermelho, telescópios como o IRAS devem ser resfriados a temperaturas criogênicas, isto é, abaixo de -150°C . IRAS foi o primeiro satélite a utilizar superfluidos no espaço, com 73 kg de hélio líquido a bordo mantendo o telescópio a uma temperatura de 2 K (-271°C). Naturalmente, o hélio evapora ao longo do tempo, esvaziando gradualmente o tanque e determinando o fim da vida do seu satélite. No caso do IRAS, isso ocorreu após 10 meses do seu lançamento, em novembro de 1983 (BEICHMAN et al., 1988).

2.2 A AMOSTRA E A GALÁXIA IRAS 09320+6134

Todas as galáxias da amostra deste estudo carregam o nome do satélite IRAS, pois fazem parte da vasta lista de objetos detectados e observados pelo telescópio. A Tabela abaixo mostra um panorama geral das 15 galáxias da amostra. As galáxias que já foram observadas no Observatório Gemini estão com os devidos programas identificados. Como já foi dito, 6 galáxias da amostra já foram estudadas, sendo que 5 já possuem resultados publicados, devidamente referenciados, e 1 está com artigo submetido para publicação. A galáxia IRAS 16399-0937 foi observada no Observatório Gemini, porém, em virtude de um problema durante a observação, não se pôde concluir nada com os dados obtidos, mas ela foi estudada e analisada em outros comprimentos de onda e não se descarta a possibilidade de solicitar nova observação pelo Observatório Gemini posteriormente. Já as galáxias IRAS 15587+1609 e IRAS 10039-3338 não foram observadas pelo Observatório Gemini ainda, mas tiveram proposta observacional aceita no semestre 2023A, de modo que logo teremos dados de espectroscopia de campo integral destes objetos.

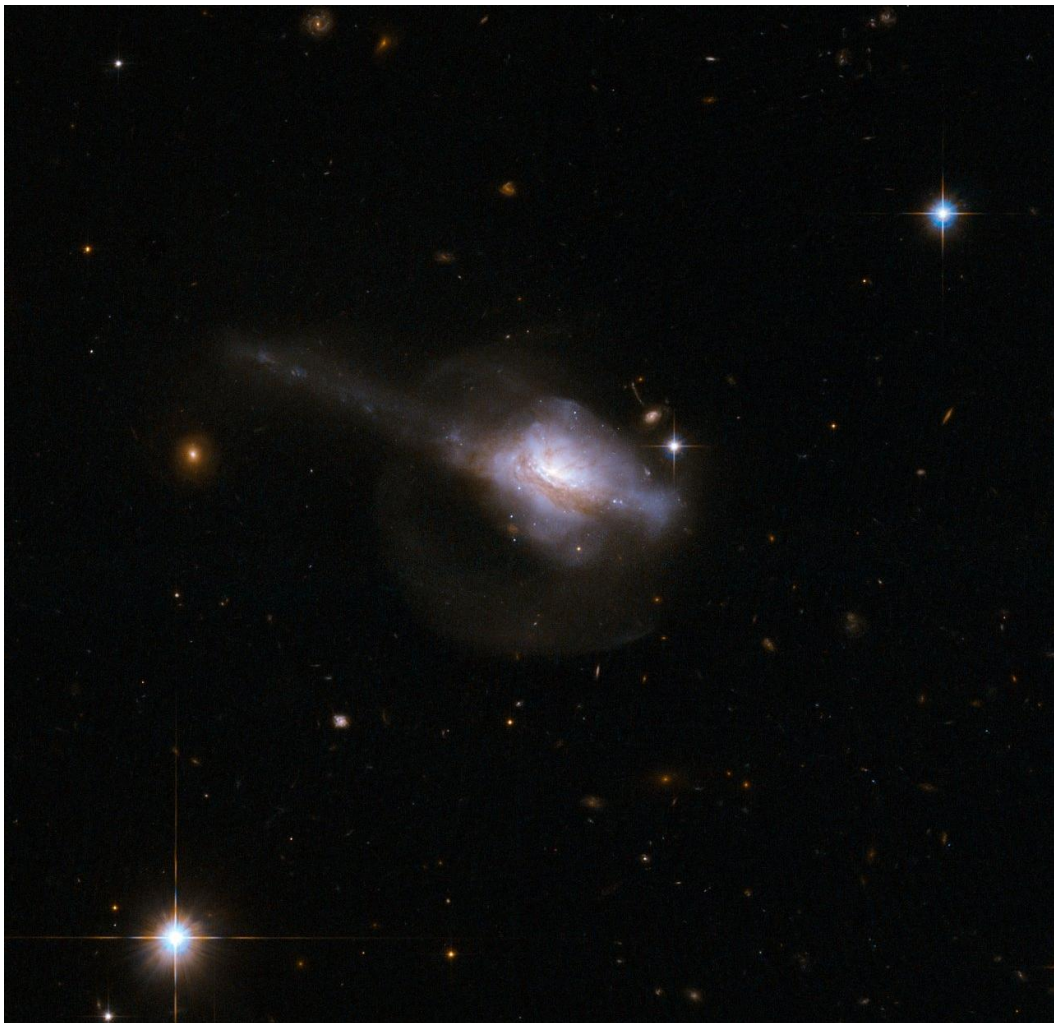
ID do programa	Galáxia	z	Classificação	Referência
GS-2017B-Q-37	IRAS 05100-2425	0.034	AGN	SIMBAD
GN-2017B-Q-38	IRAS 19154+2704	0.099	AGN	Hekatelyne et al., submetido
GS-2018B-Q-203	IRAS 06487+2208	0.143	AGN, SB	Darling e Giovanelli (2000)
	IRAS 08449+2332	0.152	SB	Nardini et al. (2010)
GN-2021B-Q-319	IRAS 00057+4021	0.045	SB	Kennicutt e Reyes (2021)
	IRAS 09320+6134	0.039	AGN, SB	Imanishi et al. (2003)
GS-2019B-Q-208	IRAS 20248+1734	0.122	SB	Darling e Giovanelli (2006)
GN-2019B-Q-306	IRAS 21077+3358	0.177	AGN	Tsuchikawa et al. (2021)
GS-2014A-Q-75	IRAS 11506-3851	0.011	AGN, SB	Hekatelyne et al. (2020)
GS-2013B-Q-86	IRAS 23199+0123	0.136	AGN	Hekatelyne et al. (2018a)
GN-2013B-Q-97	IRAS 03056+2034	0.027	AGN, SB	Hekatelyne et al. (2018b)
GS-2013A-Q-92	IRAS 17526+3253	0.026	SB	Sales et al. (2019)
-	IRAS 16399-0937	0.027	AGN	Sales et al. (2015)
*	IRAS 15587+1609	0.137	SB	Gatto e Sales (2021)
*	IRAS 10039-3338	0.034	SB	Kazes et al. (1990)

A galáxia IRAS 09320+6134, também popularmente conhecida como UGC 5101, no catálogo UGC (*Uppsala General Catalogue of Galaxies*), é o objeto de estudo principal deste trabalho. É uma galáxia com luminosidade no infravermelho estimada de $L_{IR} = 10^{11.95-12.02} L_{\odot}$ (HUANG et al., 2018; ODA et al., 2017; VIVIAN et al., 2012; HOU; WU; HAN, 2009), o que a coloca no limite entre LIRG e ULIRG. Ela possui um redshift $z = 0.03937$, que corresponde a uma distância de cerca de 175 Mpc, assumindo o valor da constante de Hubble como $H_0 = 67.8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Além de um megamaser de OH (KANDALYAN, 2005), esta galáxia também

possui um megamaser de H_2O , descrito como um dos masers de H_2O mais luminosos já detectados, com $L_{H_2O} > 100 L_{\odot}$ (ZHANG et al., 2006). Na literatura, há classificações para a ionização da galáxia IRAS 09320+6134 tanto como sendo devido à atividade Starburst (KARACHENTSEV; KARACHENTSEVA; HUCHTMEIER, 2006) quanto como sendo devido à atividade AGN (VEILLEUX et al., 1995), e ainda a ambos simultaneamente, ou seja, que há um espectro composto nesta galáxia (GONCALVES; VERON-CETTY; VERON, 1999; IMANISHI et al., 2003; LONSDALE et al., 2003; MARTINEZ-PAREDES et al., 2015).

A Figura 2.3 mostra uma imagem da galáxia IRAS 09320+6134 feita com o Telescópio Espacial Hubble como parte de uma coleção de 59 imagens de galáxias em fusão, divulgada em 2008. A galáxia é descrita como uma galáxia peculiar e podemos identificar na imagem que ela apresenta uma cauda, que se estende diagonalmente para o canto superior esquerdo da imagem, e ainda um halo tênue de estrelas envolvendo a galáxia como um todo. Ambas estas características são possivelmente resquícios do processo de interação e fusão que este objeto passou recentemente.

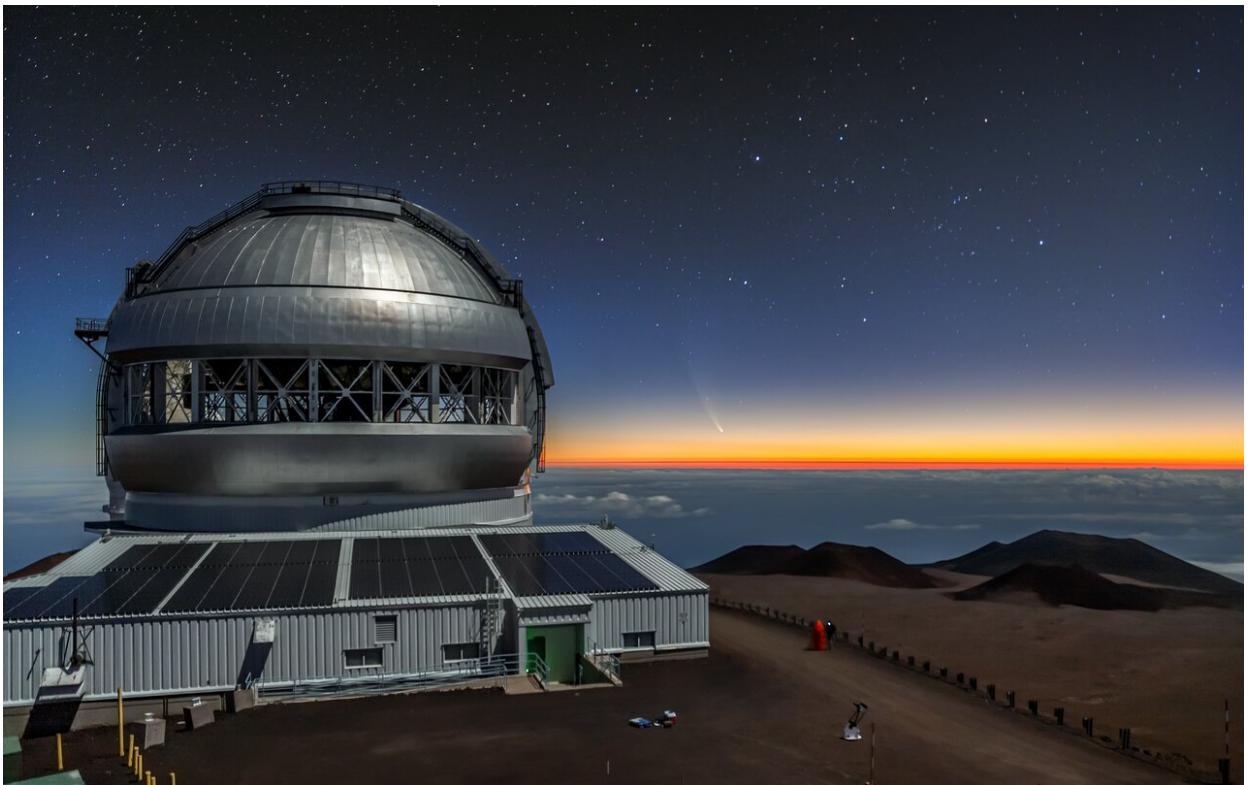
Figura 2.3 – Imagem da galáxia IRAS 09320+6134 feita com o Telescópio Espacial Hubble.



2.3 OBTENÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS

O Observatório Gemini, como o próprio nome sugere, é o nome dado a um conjunto de dois telescópios idênticos, de 8.1 m de diâmetro, que operam nos comprimentos de onda do ótico e do infravermelho. O motivo de serem dois telescópios é que cada um está localizado em um hemisfério do nosso planeta, permitindo, em conjunto, uma observação completa do céu. O Telescópio Gemini Sul está localizado no Chile, enquanto o Telescópio Gemini Norte está localizado no Havaí. O Observatório Gemini opera com uma parceria internacional de sete países: Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Chile, Austrália, Brasil e Argentina; e qualquer pesquisador ou astrônomo destes países pode submeter propostas observacionais, que serão avaliadas e aceitas ou não, respeitando a disponibilidade de tempo observacional destinada a cada um, que é proporcional ao apoio financeiro proveniente de cada um; para o caso do Brasil, esse apoio corresponde a cerca de 2%. A Figura 2.4 mostra uma imagem do Telescópio Gemini Norte, onde foram realizadas as observações deste trabalho.

Figura 2.4 – Imagem do Telescópio Gemini Norte ao amanhecer, durante passagem do cometa NEOWISE, tecnicamente conhecido como C/2020 F3, em 2020.



Fonte: International Gemini Observatory/NOIRLab/NSF/AURA/J, Pollard

2.3.1 O instrumento GMOS

O espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*) (HOOK et al., 2004) é um instrumento que opera no ótico nos modos de fenda longa, multi fendas e unidade de campo integral, e tem a capacidade de cobrir observações dentro do intervalo espectral de 3600 a 9400 Å. O modo de unidade de campo integral, ou IFU (*Integral Field Unit*) (ALLINGTON-SMITH et al., 2002), permite a obtenção de dados espectroscópicos espacialmente resolvidos em dois modos: o modo fenda única e o modo fenda dupla. No modo de fenda única, arranjos hexagonais de lentes são conectados a 750 fibras, usadas para cobrir o céu. Isso significa que é possível obter até 750 espectros simultaneamente, um para cada fibra, onde 500 correspondem ao campo principal, utilizado para observar o objeto de ciência, e 250 correspondem ao campo do céu. O modo de fenda única possui um campo de visão de $5'' \times 3.5''$. Por outro lado, no modo fenda dupla os arranjos hexagonais de lentes são conectados a 1500 fibras, de modo que é possível obter até 1500 espectros simultaneamente. Destes 1500 espectros, 1000 correspondem ao campo principal e 500 correspondem ao campo do céu. Além disso, o modo fenda dupla possui um campo de visão de $5'' \times 7''$.

No momento da observação, a luz incidente no telescópio é captada e chega a dois arranjos de lentes, de onde é conduzida até o espectrógrafo através de fibras óticas. O espectrógrafo possui dois sistemas óticos, um otimizado para a faixa de comprimentos de onda do vermelho e outro otimizado para a faixa de comprimentos de onda do azul. A metade do arranjo principal e do céu e as fibras óticas são alinhadas na entrada do sistema otimizado para o azul e a outra metade dos dois arranjos é alinhada na entrada do sistema otimizado para o vermelho. No modo de fenda única, um dos caminhos óticos é bloqueado, de modo que, neste caso, o espectrógrafo usa somente metade do arranjo, resultando em uma cobertura espectral máxima e em uma cobertura espacial de $3.5'' \times 5''$ e $1.75'' \times 5''$, nos campos principal e do céu, respectivamente. Por outro lado, no modo de fenda dupla, como as duas metades são utilizadas simultaneamente, a cobertura espectral diminui pela metade e a cobertura espacial dobra, resultando em $7'' \times 5''$ no campo principal e em $3.5'' \times 5''$ no campo do céu.

O GMOS possui um detector que é constituído por um arranjo de três CCDs (*Charge Coupled Device*) de 2048×4176 píxeis cada, com um *gap*/intervalo de 1.005 mm entre eles, resultando em um detector final de 6278×4176 píxeis. O CCDg é o CCD central, que possui uma resposta melhorada entre ~ 450 e 650 nm em comparação com os outros dois CCDs, que ficam nas extremidades esquerda e direita, o CCDb e o CCDr. Estes últimos possuem uma resposta abaixo de ~ 450 nm e acima de ~ 650 nm, respectivamente.

As observações realizadas no modo de unidade de campo integral fornecem espectros de um campo bidimensional que resultam em um cubo de dados. O cubo de dados é o produto final de um processo que chamamos de redução de dados e é o arquivo principal com o qual o pesquisador irá trabalhar e extrair informações.

2.3.2 Observações

As observações da galáxia IRAS 09320+6134 foram realizadas no Telescópio Gemini Norte, no dia 25 de janeiro de 2022, sob o projeto GN-2021B-Q-319 (PI: Hekatylene Carpes), intitulado "*The inner structure of OH Megamaser galaxies*". O instrumento GMOS foi utilizado, operando no modo de unidade de campo integral, no modo fenda única, e com uma cobertura espectral de 4500 a 7200 Å. O modo fenda única foi escolhido pois nos permite obter espectros com coberturas das principais linhas de emissão do ótico, desde $H\beta$ até $[S II]\lambda 6731$, e as medidas dos fluxos destas linhas são essenciais para a identificação dos mecanismos de excitação do gás. Foram realizadas exposições centradas em três comprimentos de onda: 5900, 6000 e 6100 Å. Esta estratégia de utilizar exposições centradas em diferentes comprimentos de onda é utilizada a fim de evitar que linhas de emissão importantes coincidam com os *gaps* entre os CCDs do GMOS. A rede B600 foi utilizada em combinação com o filtro G5307. Foram feitas 3 exposições no total, cada uma centrada em cada um dos três comprimentos de onda, e com tempo de integração de 1200 segundos para cada exposição, de modo que o tempo total de integração da galáxia foi de 1 hora.

2.3.3 Redução de dados astronômicos

Bias

O detector CCD pode apresentar alguns efeitos instrumentais, como ruídos de leitura. É possível fazer a correção de alguns desses efeitos a partir da subtração do *bias*. Depois da exposição do telescópio, os fótons, ao chegarem no CCD, são convertidos em elétrons que serão transportados para um amplificador e para um conversor analógico digital, que transformará cada carga em um pacote de dados a serem lidos pelo computador. Essa leitura é traduzida como um determinado número de contagens, as ADUs (*Analog-to-Digital Unity*), de modo que temos um ganho determinado pela razão de elétrons por ADU. Porém, esse ganho não é o mesmo para todos os CCDs, e uma carga residual ficará sobreposta ao número de contagens de fótons na imagem do objeto. Este excesso de carga é diretamente associado ao detector e independe do objeto observado e do tempo de exposição. O *bias* mede o nível zero do CCD e é obtido fazendo-se exposições do detector CCD com o obturador da câmera fechado, para que seja computado apenas o ruído, com tempo de integração muito curto (menos de 1 s). Depois, é só subtrair esta imagem de *bias* de todas as imagens obtidas na observação.

Remoção de luz difusa

Outro efeito que acomete o espectrógrafo GMOS é a dispersão de luz. Essa luz espalhada é detectada principalmente entre as fibras e é bastante significativa principalmente para exposições do *GCAL-flat* e de alvos bem expostos, como observações de estrelas padrão. Embora seja detectada majoritariamente entre as fibras, na verdade ela está em todo o campo e quanto mais brilhante a fonte, mais brilhante a luz difusa. As regiões entre as fibras são essenciais para modelar e remover a luz espalhada, pois não deve haver luz ou fluxo nessas áreas. Remover a luz difusa é um passo necessário para uma calibração em fluxo precisa.

Correção da eficiência quântica do CCD

A eficiência quântica QE do CCD é uma propriedade do dispositivo que relaciona o número de fótons detectados e o número de fótons incidentes no CCD. O espectrógrafo GMOS possui três CCDs e cada um deles possui uma eficiência quântica diferente. Tem-se que uma pseudo-fenda é lida em um CCD e meio e, como obtemos uma curva de resposta para apenas uma fenda e aplicamos às outras, os termos de cor de cada chip podem fazer com que metade de um espectro seja mais sensível no azul e a mesma metade de outro espectro seja mais sensível no vermelho, dificultando a calibração em fluxo de ambos com a mesma curva. Isso pode ser resolvido usando o CCD central como referência e fazendo uma calibração de fluxo de primeira ordem para alinhar os espectros. Uma vez que este é 1, os níveis de dois espectros adjacentes que vêm de diferentes pseudo-fendas devem ter aproximadamente a mesma forma, que pode então ser corrigida para uma ordem superior pela calibração de fluxo padrão.

Remoção de raios cósmicos

Os raios cósmicos são partículas com energias relativísticas, compostas principalmente por fótons de alta energia, elétrons, partículas alfa, raios gama e núcleos atômicos de elementos mais pesados. Estas partículas se originam em algumas regiões do Universo, principalmente em explosões estelares como supernovas, e atingem a Terra constantemente, em todas as direções, algumas interagindo com outros elementos e partículas pelo caminho e chegando até o solo, e outras atravessando nosso planeta sem interação alguma. Destas partículas interagentes, muitas podem, naturalmente, incidir sobre o telescópio e sobre o CCD durante a observação, o que pode afetar os dados, dependendo da quantidade e da região atingida, pois ocorre um excesso de energia na região atingida e, conseqüentemente, as informações contidas nas imagens sofrem alterações. A remoção dos raios cósmicos consiste na exclusão dessas regiões afetadas e é feita utilizando-se o algoritmo *L.A.Cosmic* (van Dokkum, 2001), que detecta raios cósmicos de formas e tamanhos arbitrários e distingue entre fontes pontuais subamostradas e raios cósmicos.

Flat-field

Ainda considerando os efeitos instrumentais do CCD, outra correção a ser feita é a divisão pela imagem de *flat-field* normalizada. Cada píxel responde de forma diferente a uma mesma quantidade de radiação incidente, de modo que o ganho apresentado por cada píxel do CCD não é constante, ou seja, não existe uniformidade de resposta entre os píxeis do CCD. Há vários motivos que podem ser responsáveis por estas variações de sensibilidade, como, por exemplo, alterações geométricas entre os píxeis, imperfeições de fabricação, não uniformidade de exposição da luz e do material, entre outros. Este passo da redução de dados é realizado para corrigir estas variações de sensibilidade existentes ao longo dos píxeis do detector. A imagem de *flat-field* é obtida, então, expondo o CCD a uma fonte de luz uniforme e difusa, que pode ser uma tela iluminada por luz branca (*GCAL-flat*). É feita uma média de todas as imagens *GCAL-flat*, de modo a se obter um *GCAL-flat* médio. Em seguida, é ajustado um polinômio à imagem de *GCAL-flat* médio, pelo qual as imagens *GCAL-flat* serão divididas a fim de se obter as curvas de resposta que representam as variações de sensibilidade píxel a píxel do CCD.

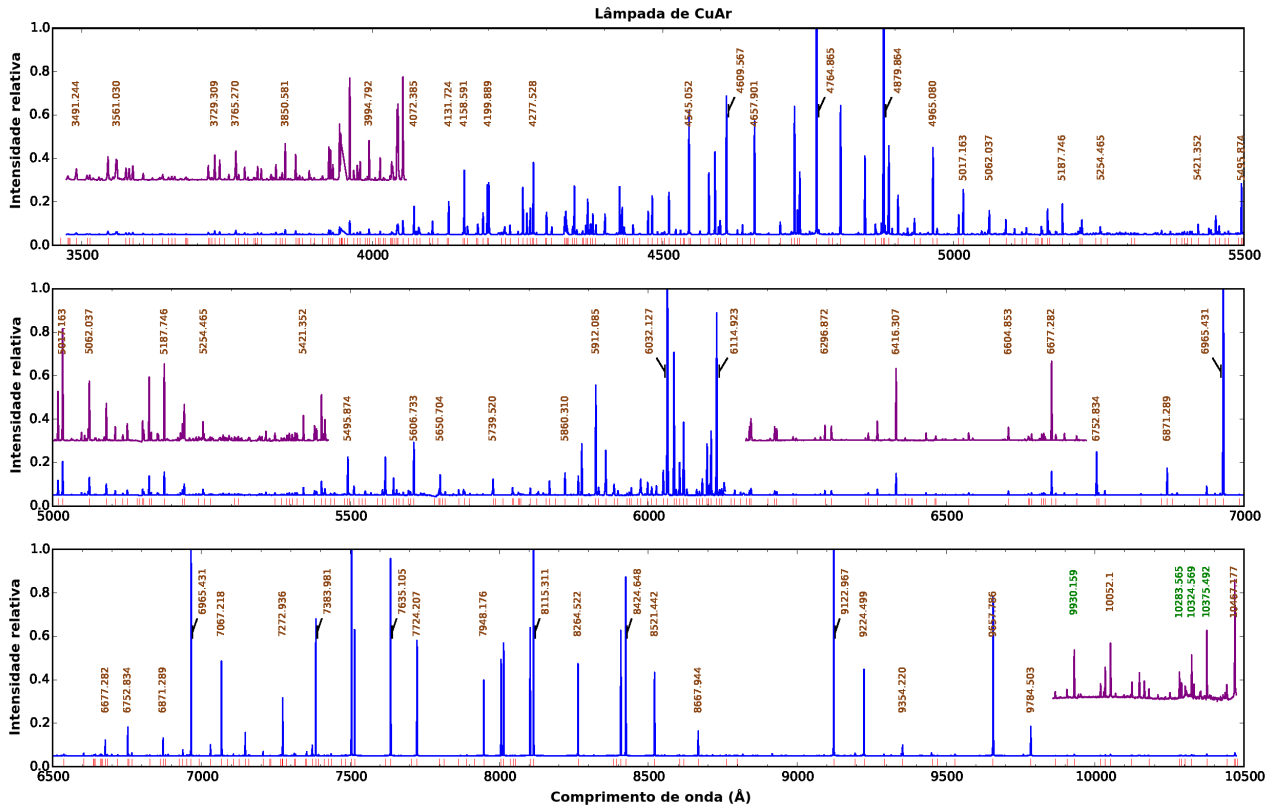
Calibração em comprimento de onda

Inicialmente, os espectros obtidos não estão calibrados em comprimentos de onda, mas sim em píxeis. Utiliza-se o espectro de uma lâmpada de comparação para esta calibração, pois as lâmpadas de comparação possuem espectros cujos comprimentos de onda das linhas de emissão são conhecidos e suficientemente espaçados entre si. Sendo assim, encontra-se a correspondência entre as posições das linhas de emissão na lâmpada e os píxeis do detector, de modo a se obter uma relação píxel-comprimento de onda, e aplica-se essa relação aos espectros de ciência e da estrela padrão. É obtida uma exposição de lâmpada no céu para cada hora de tempo de obturador aberto. Para as observações deste trabalho, foi utilizada uma lâmpada de CuAr (Cobre, Argônio). A Figura 2.5 mostra exemplos de espectros de uma lâmpada de CuAr centrados em três diferentes comprimentos de onda (4500, 6000 e 8500 Å), com mais de 400 linhas detectadas no total, onde as principais estão identificadas.

Calibração em fluxo

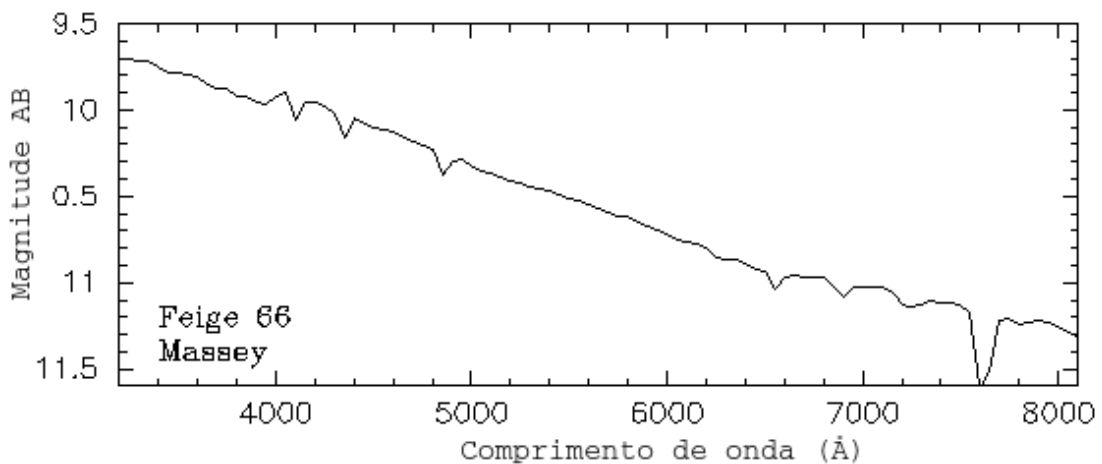
Além de não estarem calibrados em comprimentos de onda, os espectros iniciais também não estão calibrados em unidades de fluxo ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1}$), mas sim em ADUs. Para fazer a calibração em fluxo, utilizam-se espectros de estrelas padrão. É obtida uma relação entre o número de contagens de ADUs e o fluxo correspondente em cada comprimento de onda, previamente conhecido, através do espectro da estrela padrão. Essa relação, por sua vez, é aplicada aos espectros dos objetos de ciência. Para as observações deste trabalho, utilizou-se a estrela padrão Feige 66, cujo espectro é mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.5 – Espectro de uma lâmpada de CuAr em escala total (azul), com partes ampliadas (roxo) e deslocadas verticalmente para maior clareza. Mais de 400 linhas estão detectadas (vermelho) ao longo do eixo de comprimentos de onda. Algumas das linhas mais brilhantes ou mais isoladas estão identificadas. As linhas de segunda ordem no infravermelho próximo (canto inferior direito, em verde) podem ser úteis para restringir a solução de dispersão nesta parte esparsa do espectro da lâmpada.



Fonte: NOIRLab (Traduzido pela autora)

Figura 2.6 – Espectro da estrela padrão Feige 66.

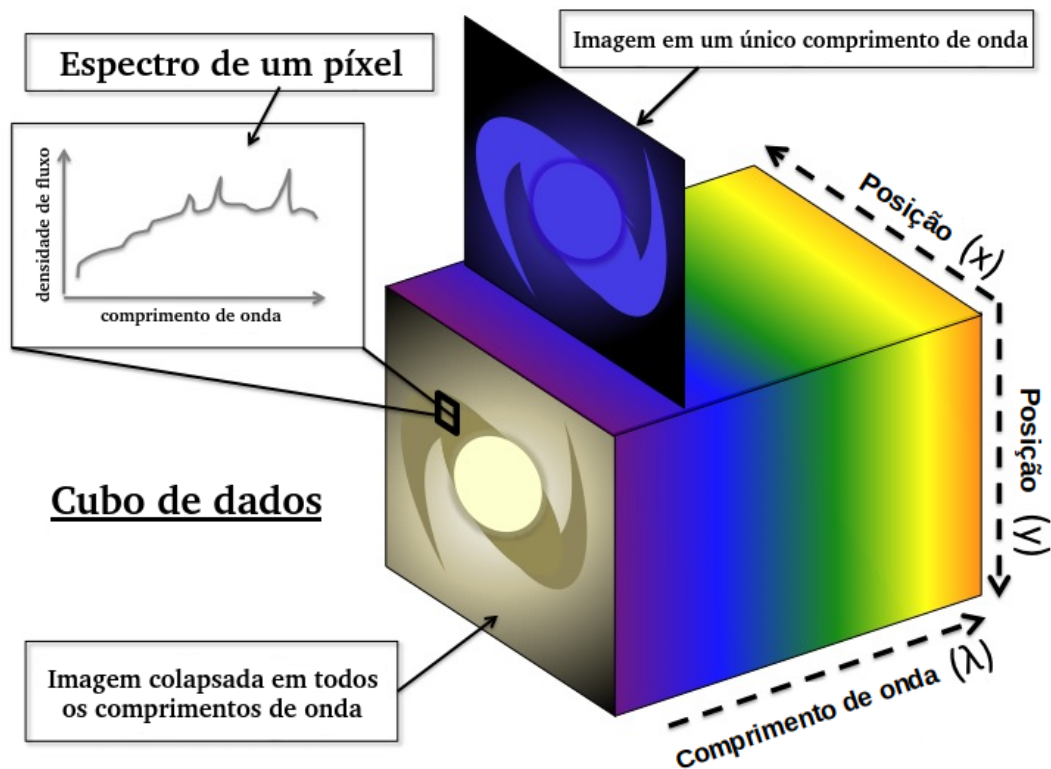


Fonte: (MASSEY et al., 1988) (Traduzido pela autora)

Cubo de dados

A última etapa da redução é a criação do cubo de dados. Para cada uma das 3 exposições da galáxia foi criado um cubo de dados individual, que posteriormente foram combinados, fazendo-se a média dos cubos individuais, a fim de se obter um único cubo, com amostragem espacial de $0.1'' \times 0.1''$. Este cubo de dados contém informações do objeto de ciência em três dimensões: duas dimensões espaciais e uma dimensão correspondente a uma faixa de comprimentos de onda. Isto significa que, para cada posição de um campo bidimensional (coordenadas x e y) há um espectro associado (comprimento de onda λ). A Figura 2.7 mostra uma representação esquemática de um cubo de dados.

Figura 2.7 – Esquemática de um cubo de dados.



Fonte: Chris Harrison (Traduzido pela autora)

A resolução espectral é a diferença mínima, em comprimentos de onda, entre duas linhas no espectro para que seja possível resolvê-las. Durante observações astronômicas, quando temos dois comprimentos de onda muito próximos, só será possível resolvê-los se a diferença entre eles for maior do que a resolução espectral do espectrógrafo do telescópio. Em outras palavras, quanto maior for a resolução espectral do espectrógrafo, mais detalhado será o espectro obtido. Podemos estimar a resolução espectral do espectrógrafo GMOS para os nossos dados a partir da largura a meia altura FWHM (*Full Width at Half Maximum*) de linhas de emissão presentes no espectro da lâmpada de CuAr, usada para a calibração em comprimentos de onda. Para os dados da galáxia IRAS 09320+6134, a resolução espectral obtida foi de $\sim 1.8 \text{ \AA}$, que

corresponde a uma resolução em velocidade de $\sim 88 \text{ km s}^{-1}$.

O número de píxeis de uma imagem é uma medida da sua resolução. Mais píxeis implicam em melhor resolução e, conseqüentemente, em uma imagem de melhor qualidade, mais rica em detalhes e cores. Do mesmo modo, para observações astronômicas, a qualidade da imagem está diretamente ligada ao número de píxeis que a matriz do CCD do espectrógrafo possui por unidade de tamanho angular. Ou seja, quanto mais píxeis no CCD, maior a resolução espacial, ou angular, e mais rica em detalhes é a imagem obtida. Em outras palavras, só é possível resolver e distinguir duas fontes pontuais se estas estiverem mais distantes uma da outra do que a resolução angular do espectrógrafo. A resolução angular do espectrógrafo pode ser estimada a partir da largura à meia altura FWHM da distribuição de fluxo da estrela padrão utilizada na calibração em fluxo, Feige 66 neste caso. Para os dados da galáxia IRAS 09320+6134 obtidos com o espectrógrafo GMOS, a resolução angular encontrada foi de $\sim 1.2''$, que corresponde a $\sim 1.02 \text{ kpc}$ na galáxia.

3 METODOLOGIA

Após a redução de dados e com o cubo de dados em mãos, podemos iniciar o estudo e a análise da galáxia de fato. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram espectros extraídos de duas regiões distintas da galáxia IRAS 09320+6134, uma na região nuclear e outra a noroeste do núcleo, onde foi detectado um braço espiral, para uma abertura de $0.1'' \times 0.1''$ e cobrindo uma região espectral de 4500 a 7200 Å. As principais linhas de emissão, nas quais foram realizados os ajustes posteriores, estão identificadas, são elas: [O III]λ5007, Hα, [N II]λλ6548,6583 e [S II]λλ6717,6731. Comparando os dois espectros, vale destacar a diferença das linhas [N II]λλ6548,6583 e Hα em cada um dos espectros. Na Figura 3.2, a linha Hα é consideravelmente mais intensa em relação às linhas [N II]λλ6548,6583, característica típica de uma região de formação estelar, condizente com o fato deste espectro ter sido derivado de uma região correspondente a um braço espiral da galáxia.

Figura 3.1 – Espectro para o spaxel nuclear, correspondente ao pico do contínuo, da galáxia IRAS 09320+6134. As linhas de emissão ajustadas estão identificadas.

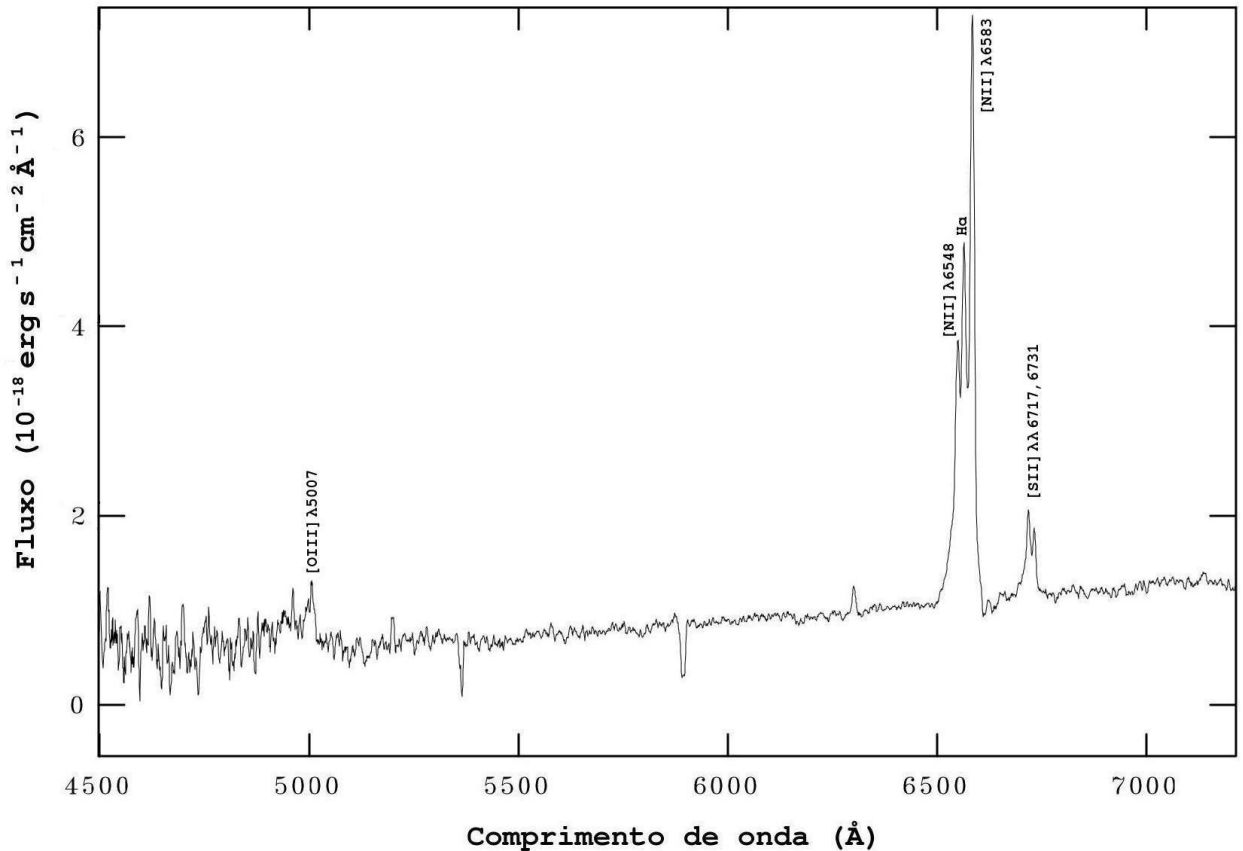
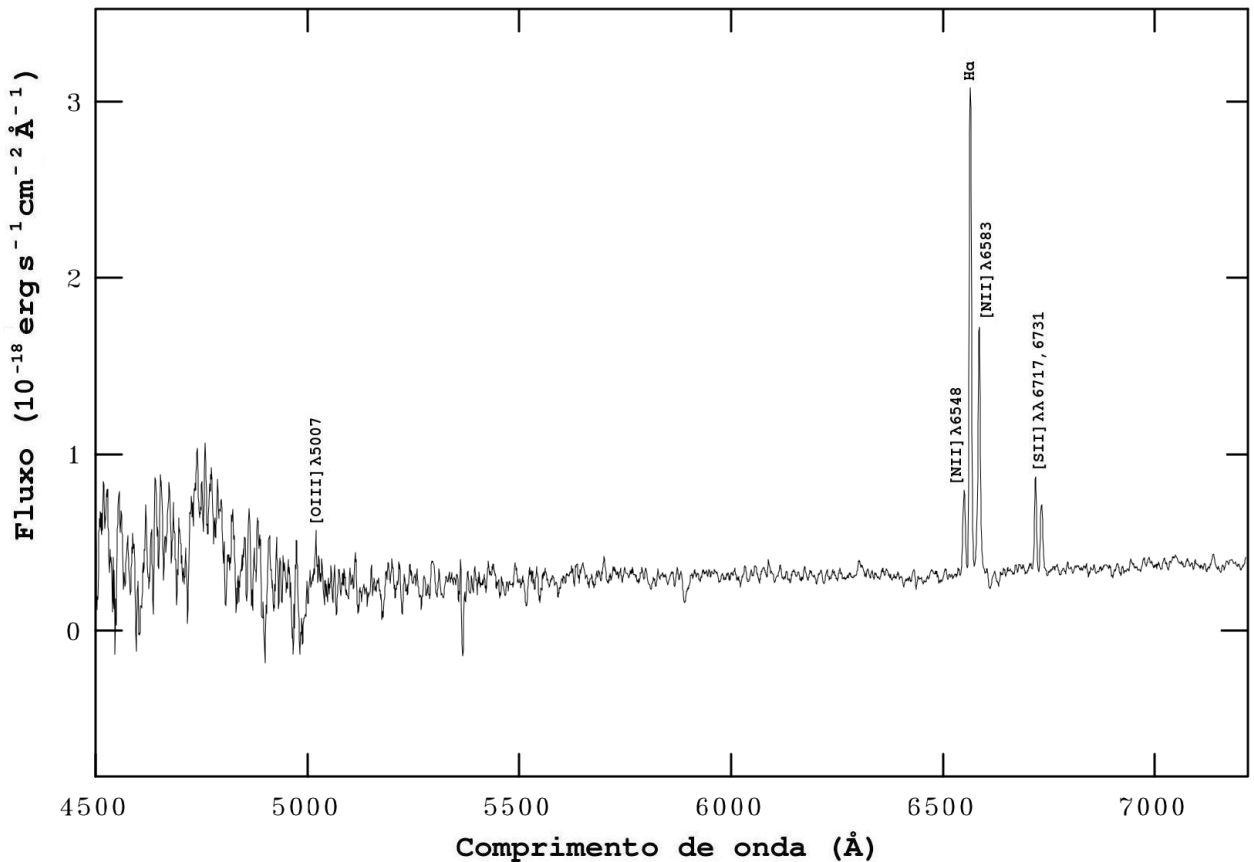


Figura 3.2 – Espectro para um spaxel a noroeste do núcleo da galáxia IRAS 09320+6134, onde foi detectado um braço espiral.



3.1 DISTRIBUIÇÃO E CINEMÁTICA DO GÁS

Em um cubo de dados, para cada posição espacial, ou spaxel, temos um espectro associado, e em cada um destes espectros existem linhas que se originam da emissão do gás na galáxia. Uma linha de emissão é produzida pela soma de todos os fótons emitidos em uma mesma transição de energia de átomos de mesma espécie. Em outras palavras, toda vez que o elétron vai, espontaneamente, de um nível superior de energia para um nível inferior, há a emissão de um fóton. Em um espectro de uma galáxia, por exemplo, uma linha de emissão observada é produzida pelos fótons emitidos em uma mesma transição de átomos que compõem o gás dessa galáxia. Sendo assim, pode-se investigar as propriedades físicas do gás e, por conseguinte, da galáxia como um todo, a partir do ajuste destas linhas de emissão.

Neste trabalho, os perfis das linhas de emissão presentes nos espectros foram ajustados utilizando-se o código IFSCube (*Integral Field Spectroscopy Cube*) (RUSCHEL-DUTRA, 2020), desenvolvido por Daniel Ruschel-Dutra. O IFSCube é um código em linguagem de programação Python e ele foi projetado para realizar tarefas de análise de espectroscopia de campo

integral em cubos de dados. Em resumo, este método nos permite fazer um mapeamento da distribuição e da cinemática do gás a partir do ajuste de séries de Gauss-Hermite e/ou curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão presentes nos espectros da galáxia.

3.1.1 Ajustes por séries de Gauss-Hermite

Para os ajustes dos perfis das linhas de emissão por séries, ou polinômios, de Gauss-Hermite, o método faz a seguinte aproximação para o perfil de uma determinada linha de emissão (van der Marel; FRANX, 1993; GERHARD, 1993; CAPPELLARI; EMSELLEM, 2004; RIFFEL, 2010):

$$GH = \frac{A\alpha(\omega)}{\sigma} \sum_{j=1}^n h_j H_j(\omega), \quad (3.1)$$

onde

$$\omega \equiv \frac{\lambda - \lambda_c}{\sigma} \quad (3.2)$$

e

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\omega^2/2}, \quad (3.3)$$

onde A é a amplitude das séries de Gauss-Hermite, λ_c é o comprimento de onda central, h_j são os momentos de Gauss-Hermite e $H_j(\omega)$ são os polinômios de Hermite. Quando o perfil da linha de emissão é similar a uma Gaussiana podemos truncar a soma em $n = 4$ e assumir $h_0 = H_0(\omega) = 1$, $h_1 = h_2 = 0$ (van der Marel; FRANX, 1993). Com estas aproximações, a Equação 3.1 pode ser reescrita como:

$$GH = \frac{A\alpha(\omega)}{\sigma} [1 + h_3 H_3(\omega) + h_4 H_4(\omega)], \quad (3.4)$$

onde

$$H_3(\omega) = \frac{1}{\sqrt{6}} (2\sqrt{2}\omega^3 - 3\sqrt{2}\omega) \quad (3.5)$$

e

$$H_4(\omega) = \frac{1}{\sqrt{24}} (4\omega^4 - 23\omega^2 + 3). \quad (3.6)$$

Os arquivos de saída, relacionados à emissão do gás, com os ajustes por séries de Gauss-Hermite, são mapas bidimensionais das distribuições de fluxo, dos campos de velocidade, das dispersões de velocidade e dos momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 do gás, para cada linha de emissão ajustada. Os fluxos são obtidos pela integração direta da Equação 3.4. As velocidades são obtidas a partir do comprimento de onda central λ_0 das linhas, usando a equação para o efeito Doppler dada por

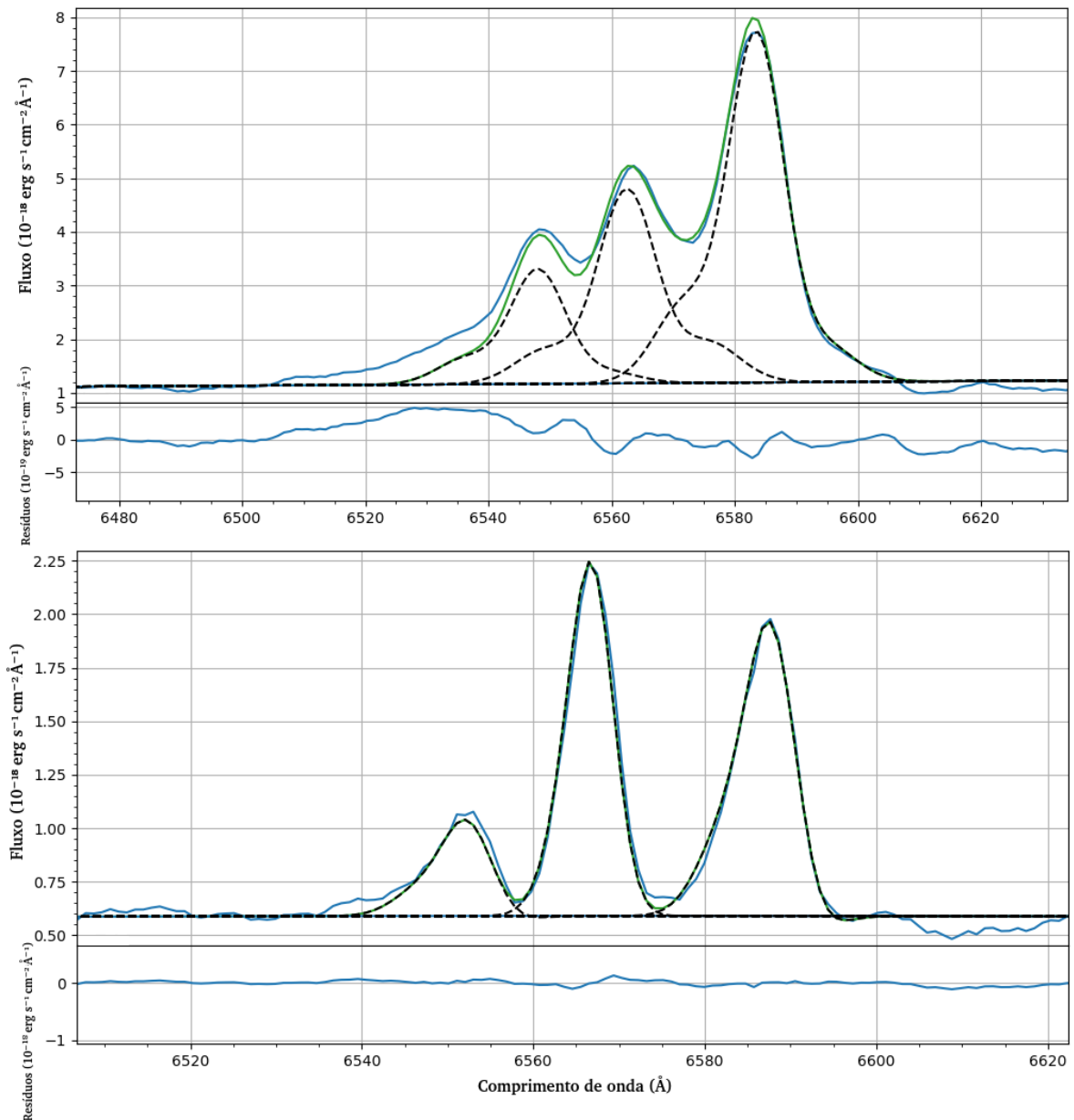
$$V = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} c - V_s, \quad (3.7)$$

onde V_s é a velocidade sistêmica da galáxia, λ é o comprimento de onda medido para a linha,

λ_0 é o comprimento de onda central teórico e c é o módulo da velocidade da luz no vácuo. Para representar o espectro contínuo, utilizamos polinômios de Legendre de ordem 4. Durante os ajustes, mantivemos fixas as razões das intensidades de $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O III}]\lambda 4959$ e $[\text{N II}]\lambda 6583/[\text{N II}]\lambda 6548$ aos seus valores teóricos de 2.98 e 3.06, respectivamente.

A Figura 3.3 mostra exemplos de ajustes por séries de Gauss-Hermite para as linhas do $[\text{N II}]\lambda 6548$, $\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]\lambda 6583$, respectivamente, para o spaxel do núcleo, correspondendo ao pico da emissão contínua, no topo, e para um spaxel distante do núcleo $\sim 1.75''$ para oeste, abaixo. Os perfis observados estão representados em azul, o ajuste em verde e as componentes individuais em linhas pontilhadas pretas. Nos painéis inferiores são mostrados os resíduos do ajuste, obtidos pela subtração do espectro observado pelo modelo.

Figura 3.3 – Exemplos de ajustes por séries de Gauss-Hermite para o spaxel nuclear, no topo, e um spaxel a $\sim 1.75''$ para oeste do núcleo, abaixo. Os perfis observados estão representados em azul, o ajuste em verde e as componentes individuais em linhas pontilhadas pretas.



3.1.2 Ajustes com curvas Gaussianas

Apesar dos ajustes dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite serem capazes de reproduzirem os perfis das linhas de emissão na maioria das posições da galáxia, observou-se que, em alguns spaxels, os resíduos do ajuste foram maiores do que o ruído presente nos espectros. Desse modo, decidimos realizar o ajuste das linhas de emissão com curvas Gaussianas, utilizando duas curvas Gaussianas para cada perfil. Retomando a Equação 3.4, se considerarmos $h_3 = h_4 = 0$, temos a equação de uma função Gaussiana, dada por:

$$G = \frac{A\alpha(\omega)}{\sigma} \quad (3.8)$$

Os arquivos de saída do ajuste com curvas Gaussianas, relacionados à emissão do gás, são mapas bidimensionais das distribuições de fluxo, dos campos de velocidade e das dispersões de velocidade para cada linha de emissão ajustada. Do mesmo modo das séries de Gauss-Hermite, os fluxos são obtidos pela integração de cada curva Gaussiana, enquanto as velocidades são obtidas a partir do comprimento de onda central λ_0 das linhas, juntamente com a equação para o efeito Doppler dada na Equação 3.7.

A Figura 3.4 mostra exemplos de ajustes com duas curvas Gaussianas para as linhas do [N II] λ 6548, H α , [N II] λ 6583, respectivamente, para as mesmas posições mostradas na Figura 3.3. Os perfis observados estão representados em azul, o ajuste em verde e as componentes individuais em linhas pontilhadas pretas. Nota-se que os resíduos dos ajustes com curvas Gaussianas são menores do que os obtidos nos ajustes por séries de Gauss-Hermite. Em todos os mapas apresentados no próximo capítulo, somente consideramos componentes em que a amplitude da função ajustada é maior do que três vezes o desvio padrão no contínuo em regiões próximas a cada linha de emissão.

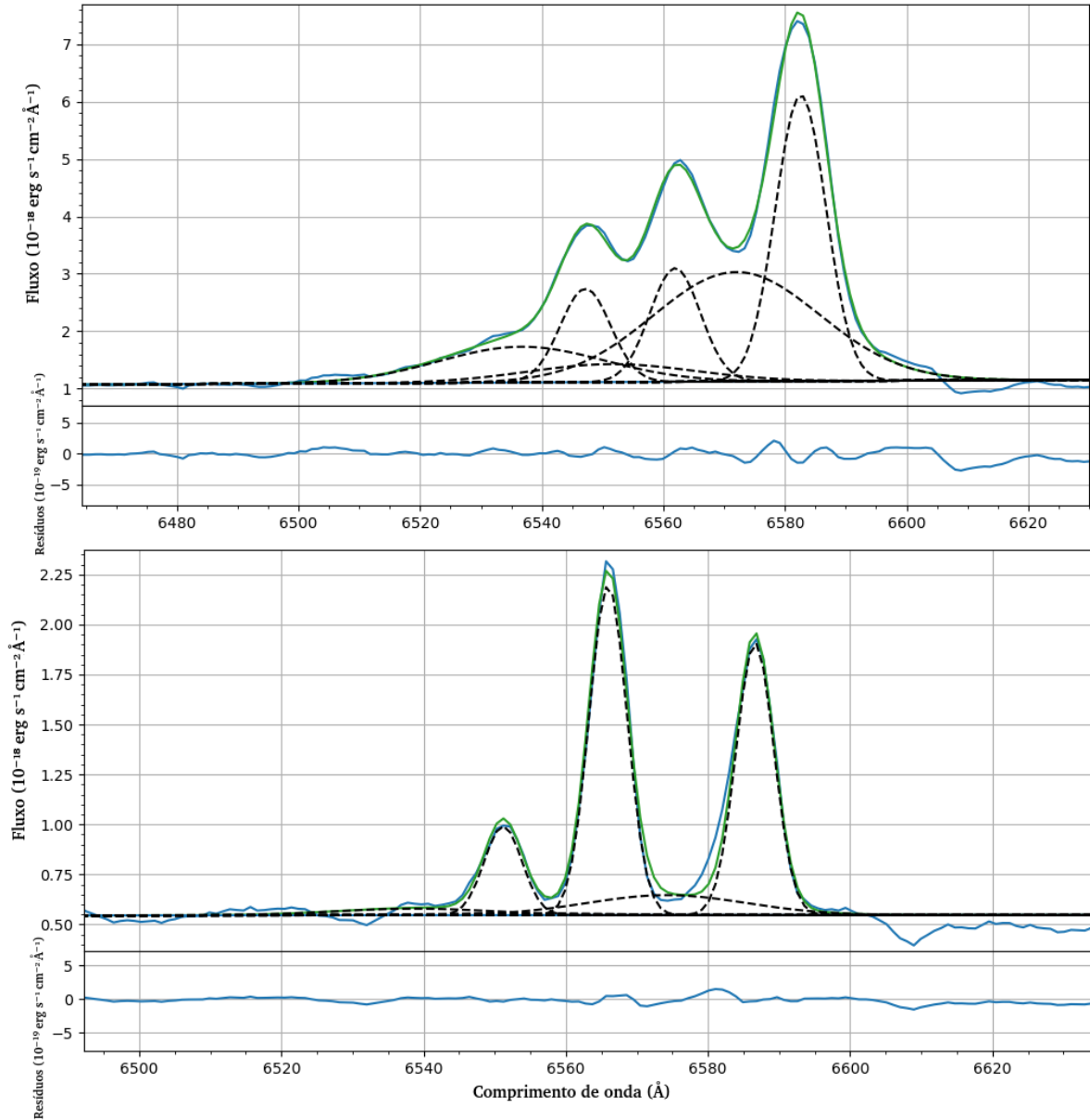
3.2 DENSIDADE ELETRÔNICA

O estudo da distribuição de densidade eletrônica em galáxias com núcleo ativo é um importante parâmetro para se extrair informações a respeito destes objetos. Com a densidade eletrônica pode-se, por exemplo, estimar a massa de gás ionizado, interpretar espectros de emissão e ainda calcular a composição química do gás (CASTANEDA; VILCHEZ; COPETTI, 1992).

A densidade eletrônica N_e é medida em número de partículas, elétrons neste caso, por unidade de volume, cm^3 . Ela pode ser derivada da razão das intensidades de duas linhas de emissão de um mesmo íon, emitidas por diferentes níveis com energias de excitação próximas, de modo que as taxas de excitação relativas entre os dois níveis dependem somente da razão das forças de colisão. Se os dois níveis tiverem diferentes probabilidades de transição radiativa ou diferentes taxas de desexcitação colisional, as populações relativas dos dois níveis e a razão das intensidades das linhas que eles emitem dependerão da densidade eletrônica (OSTERBROCK;

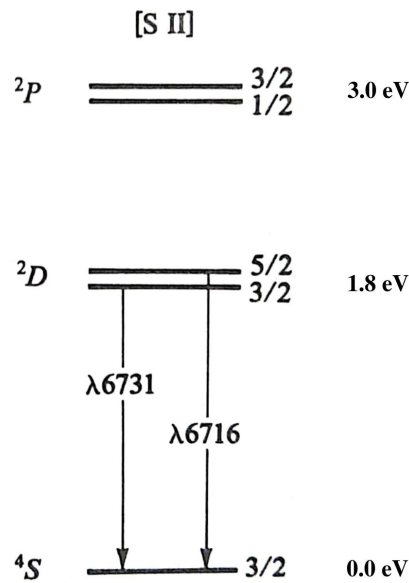
FERLAND, 2006).

Figura 3.4 – Exemplos de ajustes por curvas Gaussianas para o spaxel nuclear, no topo, e um spaxel a $\sim 1.75''$ para oeste do núcleo, abaixo. Os perfis observados estão representados em azul, o ajuste em verde e as componentes individuais em linhas pontilhadas pretas.



As razões de linhas mais indicadas para a determinação da densidade eletrônica no ótico são [O II] λ 3729/3726 e [S II] λ 6716/6731. Para este trabalho, medimos a densidade eletrônica a partir da razão de linhas do [S II]. A Figura 3.5 mostra o diagrama de níveis de energia de configuração fundamental $3p^3$ do [S II]. As linhas de emissão do [S II] são produzidas pela transição entre os níveis $^2D_{5/2} - ^4S_{3/2}$, para 6716 Å, e $^2S_{3/2} - ^4S_{3/2}$, para 6731 Å.

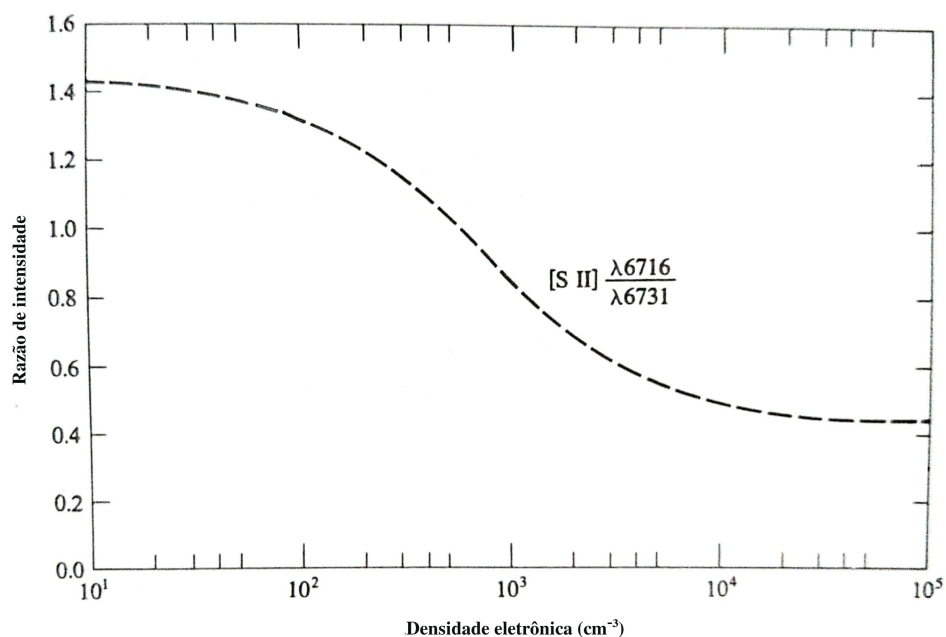
Figura 3.5 – Diagrama dos níveis de energia da configuração fundamental $3p^3$ do [S II].



Fonte: (OSTERBROCK; FERLAND, 2006) (Editado pela autora)

A densidade eletrônica foi calculada utilizando-se a ferramenta PyNeb (LURIDIANA; MORISSET; SHAW, 2015), um código em linguagem Python para a análise de linhas de emissão. Além da razão das intensidades das linhas do [S II] $\lambda 6716$ e [S II] $\lambda 6731$, o cálculo para a densidade eletrônica leva também em conta a temperatura eletrônica T_e . A Figura 3.6 apresenta uma curva da dependência existente entre as razões de linhas e a densidade eletrônica, considerando uma temperatura eletrônica $T_e = 10000$ K.

Figura 3.6 – Curva de dependência de [S II] $\lambda 6716/6731$ em função da densidade eletrônica para uma temperatura $T_e = 10000$ K.



Fonte: (OSTERBROCK; FERLAND, 2006) (Editado pela autora)

3.3 MECANISMOS DE EXCITAÇÃO DO GÁS

Os diagramas de diagnóstico são uma maneira bastante utilizada para determinar mecanismos de excitação e ionização do gás em galáxias e, assim, classificá-las. Eles consistem em gráficos cartesianos, onde cada um dos eixos representa a razão entre os fluxos de um par de linhas de emissão e cada um dos pontos no gráfico representa as razões de linhas para cada spaxel da galáxia. Quando plotados, os pontos no gráfico podem cair em diferentes regiões de classificação, divididas de diferentes maneiras conforme o tipo de diagrama de diagnóstico utilizado. Neste trabalho utilizamos os diagramas de diagnóstico BPT e WHAN para a classificação quanto ao mecanismo de ionização da galáxia IRAS 09320+6134.

3.3.1 Diagrama de diagnóstico BPT

O diagrama BPT, cujo nome faz referência às iniciais dos autores Baldwin, Phillips e Terlevich (BALDWIN; PHILLIPS; TERLEVICH, 1981), é um tipo de diagrama de diagnóstico que permite a distinção quanto à fonte de ionização do gás na galáxia ser devido a uma região de formação estelar, a um AGN ou a ambos, no caso de objetos de transição.

O primeiro diagrama BPT, apresentado no trabalho de 1981, difere consideravelmente do que estamos acostumados a trabalhar hoje em dia. Ele possuía apenas uma linha divisória no gráfico, demarcando apenas dois mecanismos de ionização: regiões H II e AGNs. Apenas com o aparecimento de grandes levantamentos espectroscópicos de galáxias, destacando-se o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), é que a quantidade de pontos no diagrama BPT tornou-se suficiente para delimitar mais precisamente as regiões no gráfico. O diagrama BPT atual é dividido em quatro regiões, delimitadas por linhas que representam os limites de separação entre os diferentes mecanismos de ionização e excitação do gás. Estas linhas foram propostas por Kewley et al. (2001), Kauffmann et al. (2003) e Schawinski et al. (2007) e dividem o diagrama nos seguintes mecanismos de ionização e excitação do gás:

1. **Seyfert:** Descobertas por Carl Seyfert em 1943, as galáxias Seyfert consistem em uma classe de AGNs de galáxias espirais com núcleo compacto e muito brilhante, podendo inclusive exceder a luminosidade do restante da galáxia. Apresentam linhas de emissão intensas de alta excitação. Podem ser classificadas em dois tipos, de acordo com seu espectro: Seyfert 1, que apresentam linhas de emissão alargadas e estreitas, e Seyfert 2, que apresentam apenas linhas de emissão estreitas.
2. **LINER:** Galáxias do tipo LINER (*Low Ionization Nuclear Emission Region*) correspondem aos AGNs de mais baixa luminosidade. Possuem linhas de emissão estreitas, semelhantes às encontradas em Seyferts 2, porém de baixa ionização quando comparadas àquelas observadas em outros tipos de AGN.
3. **Starburst:** Galáxias Starburst correspondem a uma classe de galáxias onde há um pro-

cesso intenso e contínuo de formação estelar, geralmente mais predominante na região nuclear. São um excelente laboratório para o estudo da evolução de estrelas massivas e dos processos físicos associados aos primeiros estágios de formação de galáxias.

4. **Objetos de transição:** Consistem em objetos que apresentam espectro composto, ou seja, tanto relacionado a regiões de formação estelar (Starburst) quanto devido a um AGN (Seyfert ou LINER).

Há diversas possibilidades de linhas de emissão cuja razão dos fluxos pode ser utilizada para a construção dos mapas de diagnóstico. Para este trabalho, apresentamos o diagrama de diagnóstico BPT para as razões de linhas do $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ versus $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$, onde os delimitadores de regiões obedecem aos seguintes critérios:

- **Seyfert:** $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > 1.19 + 0.61/[\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)]$, além disso: $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > 0.48 + 1.01 \log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$;
- **LINER:** $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > 1.19 + 0.61/[\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) - 0.47]$, além disso: $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) < 0.48 + 1.01 \log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$;
- **Starburst:** $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) < 1.3 + 0.61/[\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) - 0.05]$;
- **Objetos de transição:** $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) < 1.19 + 0.61/[\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) - 0.47]$ e também: $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > 1.3 + 0.61/[\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) - 0.05]$.

3.3.2 Diagrama de diagnóstico WHAN

O diagrama WHAN, proposto por Fernandes et al. (2011), é outro tipo de diagrama de diagnóstico, bastante semelhante ao diagrama BPT, pois também permite a análise e distinção quanto à fonte de ionização e excitação do gás em galáxias ser devido a uma região de formação estelar e/ou a um AGN.

Uma das diferenças entre os diagramas BPT e WHAN é que este último é uma alternativa mais econômica, pois necessita apenas de informações das linhas de emissão do $\text{H}\alpha$ e do $[\text{N II}]\lambda 6584$ para ser construído. O diagrama WHAN consiste em um gráfico onde um dos eixos corresponde à largura equivalente EW (*equivalent width*) do $\text{H}\alpha$ e o outro eixo corresponde à razão dos fluxos de $[\text{N II}]\lambda 6584$ por $\text{H}\alpha$, ou seja, temos $\text{EWH}\alpha$ versus $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$, ou simplesmente $\text{WH}\alpha$ versus $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, de onde, inclusive, sai o nome do diagrama, sendo **WHA** devido ao $\text{WH}\alpha$ e o **N** devido ao $[\text{N II}]$. Outra diferença entre os diagramas é que o diagrama WHAN traz um detalhamento maior quanto aos AGNs, de modo que temos as seguintes regiões para os mecanismos de ionização e excitação do gás: galáxias Starburst (SF - *Star-forming*); AGNs fortes (sAGN - *strong AGN*), representados pelas galáxias Seyfert; AGNs fracos (wAGN - *weak AGN*), representados pelos LINERs; e as galáxias aposentadas (RG - *retired galaxy*) ou falsos AGNs, que são galáxias que pararam de formar estrelas e são ionizadas por suas estrelas quentes evoluídas de baixa massa, podendo também englobar os LINERs. Tem-se,

portanto, quatro regiões no diagrama WHAN, delimitadas conforme os seguintes critérios:

- **Starburst:** $\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) < -0.4$ e $\text{EWH}\alpha > 3 \text{ \AA}$;
- **AGNs fortes:** $\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) > -0.4$ e $\text{EWH}\alpha > 6 \text{ \AA}$;
- **AGNs fracos:** $\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) > -0.4$ e $3 \text{ \AA} < \text{EWH}\alpha < 6 \text{ \AA}$;
- **Falsos AGNs:** $\text{EWH}\alpha < 3 \text{ \AA}$.

4 RESULTADOS

4.1 ESTRUTURA DE EMISSÃO E CINEMÁTICA DO GÁS PARA TODAS AS GALÁXIAS

Embora o objetivo do presente trabalho seja fazer uma análise detalhada da estrutura de emissão e cinemática do gás na região central da galáxia IRAS 09320+6134, realizamos também a redução de dados dos demais objetos da amostra que já foram observados com o instrumento GMOS e cujos resultados ainda não foram publicados. Para estes outros seis objetos, apresentamos resultados preliminares das distribuições de fluxo e cinemática do gás a partir do ajuste dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite. Foram realizados ajustes de todas as linhas de emissão mais intensas, porém apresentamos somente resultados para a linha $H\alpha$, a fim de ter um panorama geral da cinemática e emissão do gás nestas galáxias. Estudos detalhados de cada um dos objetos serão realizados posteriormente.

A Figura 4.1 mostra um panorama geral dos resultados para as 6 galáxias da amostra não estudadas anteriormente por nosso grupo. Apresentamos, da esquerda para a direita, mapas de distribuições de fluxo, campos de velocidade, dispersões de velocidade e momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 para a linha de emissão $H\alpha$ das galáxias IRAS 05100-2425 (1), IRAS 06487+2208 (2), IRAS 08449+2332 (3), IRAS 21077+3358 (4), IRAS 20248+1734 (5) e IRAS 00057+4021 (6), respectivamente, de cima para baixo. Em todos os mapas, o norte está para cima e o oeste está para a direita, e as regiões em cinza correspondem a spaxels onde a linha $H\alpha$ não foi detectada. É importante ressaltar que estes resultados são preliminares, de modo que alguns ajustes ainda estão relativamente ruins e serão melhorados posteriormente. De qualquer forma, já conseguimos extrair algumas informações a respeito da cinemática e distribuição do gás nestes objetos.

A análise dos mapas de distribuições de fluxo mostram o pico de emissão no núcleo para todas as galáxias. As galáxias (1), (3) e (4) apresentam emissão até $\sim 1.5''$, $\sim 3''$ e $\sim 2''$, respectivamente, enquanto as galáxias (2), (5) e (6) apresentam emissão estendida em todo campo. Além disso, observamos uma região de intensa emissão a leste do núcleo da galáxia (6), que pode ser atribuída a um complexo de regiões de formação estelar.

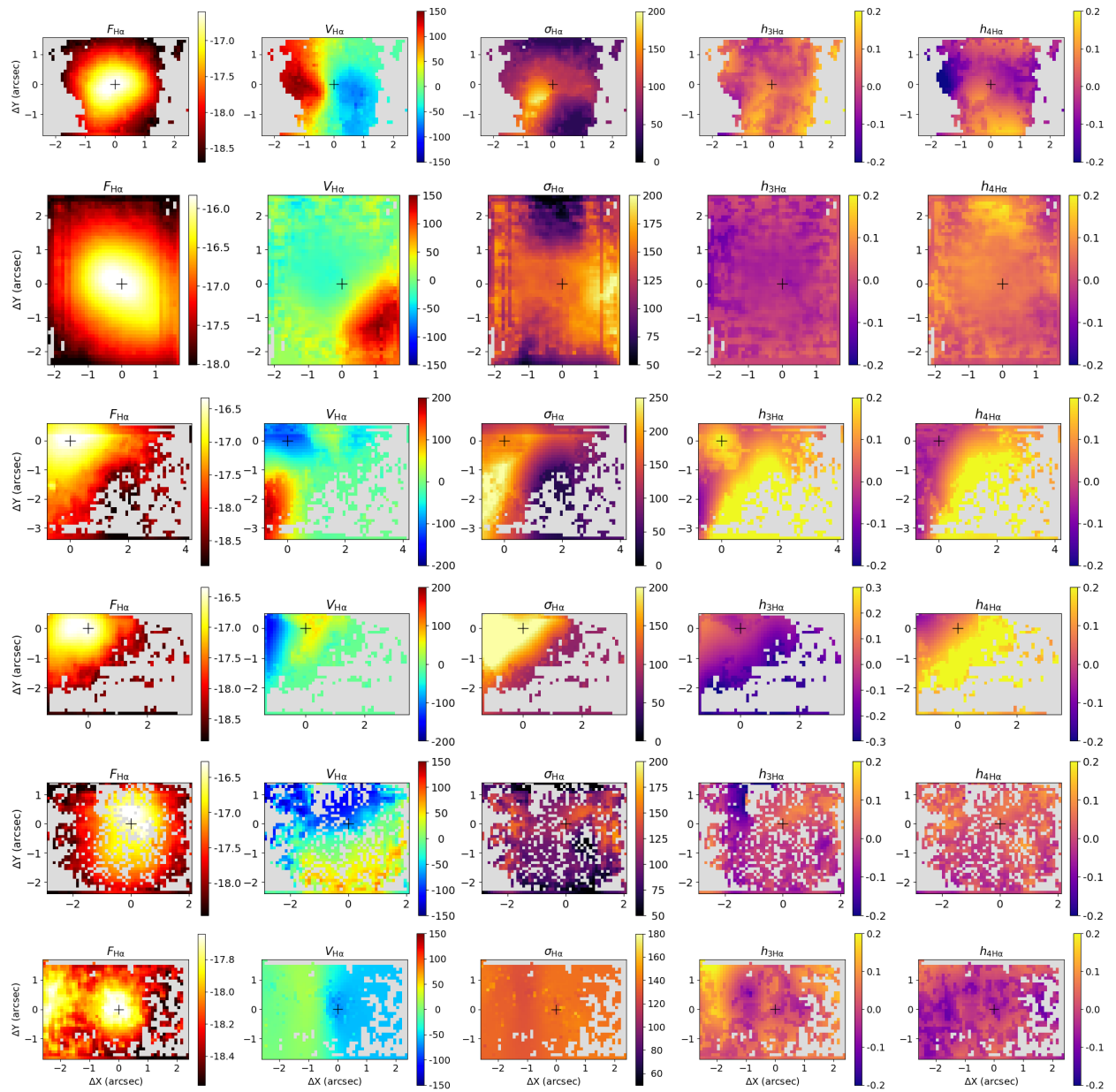
Os campos de velocidade indicam um padrão de rotação para a maioria das galáxias, com amplitudes projetadas que vão desde $\sim 80 \text{ km s}^{-1}$, para os objetos (4) e (5), até $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ para os objetos (1) e (3). A galáxia (2) apresenta *redshifts* a sudoeste do núcleo e a galáxia (6) apresenta a maior parte das regiões com velocidades próximas à velocidade sistêmica da galáxia. As dispersões de velocidade, de modo geral, apresentam valores que variam entre ~ 50 e $\sim 250 \text{ km s}^{-1}$, com os máximos valores nem sempre coincidentes com o pico de emissão de $H\alpha$.

Os mapas para o momento de Gauss-Hermite h_3 apresentam valores positivos e negativos para todas as galáxias, sendo que valores negativos indicam a presença de asas azuis nos perfis das linhas de emissão e valores positivos, por outro lado, indicam a presença de asas vermelhas. Da mesma forma, os mapas para o momento de Gauss-Hermite h_4 também apresentam tanto valores positivos quanto negativos para todas as galáxias, indicando que os perfis observados para a linha de emissão $H\alpha$ apresentam desvios simétricos e assimétricos.

Dessa forma, o panorama geral para estas 6 galáxias mostra que todas apresentam emissão de gás localizado no disco da galáxia, cujos campos de velocidade são consistentes com um disco em rotação. Adicionalmente, todos os objetos apresentam distorções de um padrão de rotação pura, como indicado pelos mapas dos momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 , os quais apresentam valores significativamente diferentes de zero, indicando a presença de desvios dos perfis observados em relação a uma função gaussiana.

Embora tenhamos realizado medidas das propriedades globais para 6 objetos, apresentamos uma análise detalhada da emissão e cinemática do gás somente para a galáxia IRAS 09320+6134. Mapeamos a cinemática, distribuição e excitação do gás nesta galáxia, a partir de ajustes de séries de Gauss-Hermite e curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão presentes nos espectros. Os resultados e discussões a seguir são referentes ao estudo desta galáxia.

Figura 4.1 – Panorama geral de ajustes por séries de Gauss-Hermite de outras 6 galáxias da amostra. Da esquerda para a direita, mapas de distribuições de fluxo, campos de velocidade, dispersões de velocidade e momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 para a linha de emissão $H\alpha$ das galáxias IRAS 05100-2425 (1), IRAS 06487+2208 (2), IRAS 08449+2332 (3), IRAS 21077+3358 (4), IRAS 20248+1734 (5) e IRAS 00057+4021 (6), respectivamente, de cima para baixo. Em todos os mapas, o norte está para cima e o leste para a esquerda, e as regiões em cinza correspondem a spaxels onde a linha $H\alpha$ não foi detectada.



4.2 IRAS 09320+6134: DISTRIBUIÇÃO E CINEMÁTICA DO GÁS

4.2.1 Ajustes por séries de Gauss-Hermite

Na Figura 4.2 apresentamos, da esquerda para a direita, mapas bidimensionais das distribuições de fluxo, dos campos de velocidade, das dispersões de velocidade e dos momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 para as linhas de emissão [O III] λ 5007, H α , [N II] λ 6583 e [S II] λ 6731, de cima para baixo, respectivamente, da galáxia IRAS 09320+6134.

Os mapas de distribuições de fluxo apresentam emissão estendida em todo o campo, com um pico de emissão no núcleo para todas as linhas. Em níveis intermediários de fluxo, observa-se uma faixa circumnuclear, semelhante a um semicírculo, de intensa emissão que se estende do norte até o oeste do campo, mas claramente observada nos mapas para as linhas H α e [S II] λ 6731. Possivelmente essa região corresponde a um braço espiral da galáxia, onde há formação estelar. Os fluxos são mostrados em unidades logarítmicas de $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{spaxel}^{-1}$. As regiões em cinza correspondem a regiões mascaradas, onde a amplitude da linha de emissão é menor do que 3σ em regiões de contínuo próximas a cada linha.

Os campos de velocidade mostram claramente um padrão de rotação para as linhas do H α , do [N II] λ 6583 e do [S II] λ 6731, com *redshifts* a oeste do núcleo, indicando que este lado está se afastando de nós, e *blueshifts* a leste do núcleo, indicando que este lado está se aproximando de nós, e uma amplitude de velocidades de aproximadamente 200 km s^{-1} . O padrão de rotação não está evidente para a linha [O III] λ 5007, que apresenta a maior parte das regiões com velocidades próximas à velocidade sistêmica da galáxia. Isso pode ser um indicativo de que a emissão desta linha é dominada pela componente larga, referente a um *outflow*, hipótese que será melhor explorada posteriormente, com os ajustes de curvas Gaussianas. Os mapas de velocidades são apresentados após a subtração da velocidade sistêmica da galáxia, no valor aproximado de 11772 km s^{-1} , definida como o valor médio da componente estreita de [N II] em um raio menor do que $0.5''$.

As dispersões de velocidade apresentam valores entre ~ 50 e 300 km s^{-1} . Os menores valores de dispersão são observados para o [O III] λ 5007, com $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$ em regiões mais afastadas do núcleo e até $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ no núcleo e suas redondezas. Para as linhas do H α , do [N II] λ 6583 e do [S II] λ 6731, observamos valores mais altos de dispersões, indo desde $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ em regiões mais afastadas do núcleo até $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$ para a região nuclear do [N II] λ 6583 e do [S II] λ 6731, e até $\sim 300 \text{ km s}^{-1}$ na região nuclear do H α .

O momento de Gauss-Hermite h_3 mede o desvio assimétrico em relação a um perfil Gaussiano, como asas azuis ou vermelhas, onde valores negativos de h_3 indicam a presença de asas azuis nos perfis das linhas de emissão, e valores positivos de h_3 , por sua vez, mapeiam as asas vermelhas. O momento de Gauss-Hermite h_4 quantifica o pico do perfil, com valores positivos de h_4 indicando um perfil mais pontiagudo e valores negativos de h_4 indicando um

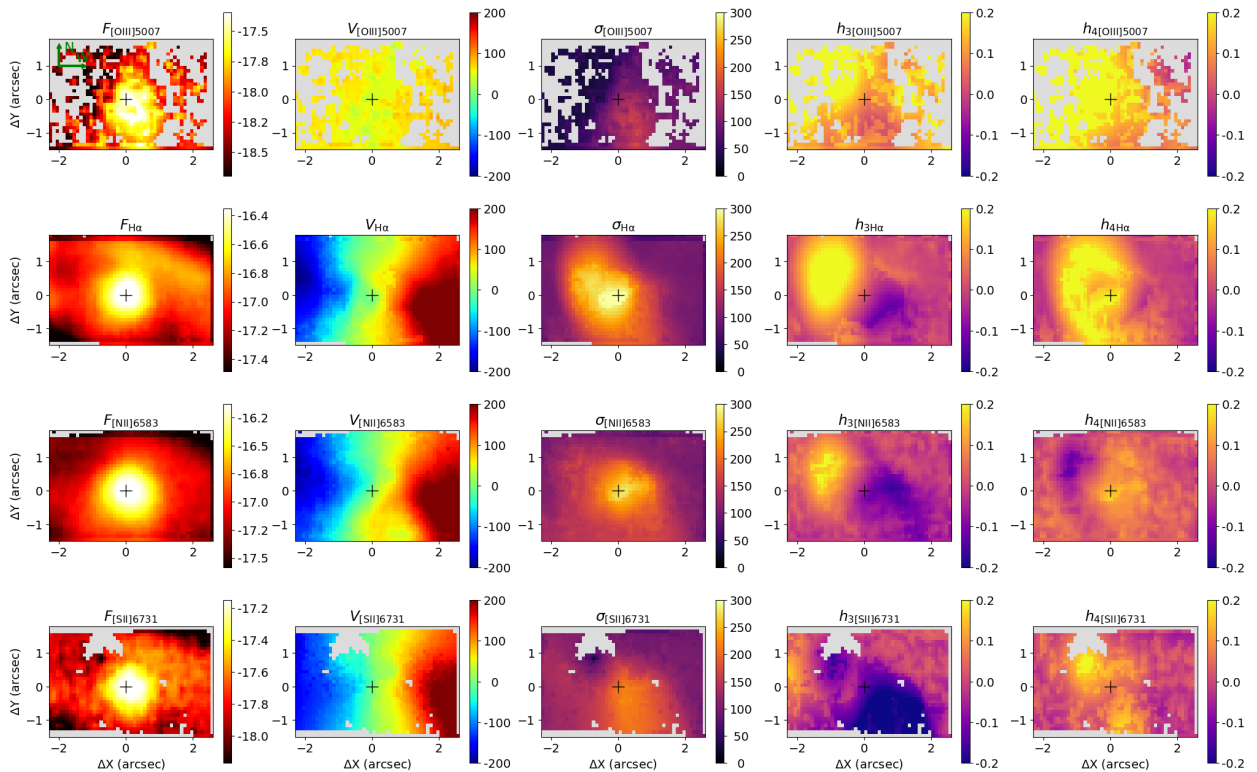
perfil mais largo do que uma curva Gaussiana.

Os mapas para o momento de Gauss-Hermite h_3 apresentam tanto valores positivos quanto valores negativos para todas as linhas de emissão, exceto para a linha [O III] λ 5007, cujo campo é dominado por valores positivos, e para a linha [S II] λ 6731 que, embora apresente valores positivos no extremo leste, possui o restante do campo dominado por valores negativos. Para todas as linhas, os valores positivos são observados majoritariamente na região onde os campos de velocidade apresentam *blueshifts*, enquanto que os valores negativos são vistos onde os campos de velocidade mostram *redshifts*. Em outras palavras, as linhas de emissão apresentam asas azuis em regiões onde os campos de velocidade apresentam velocidades positivas e asas vermelhas, determinadas a partir da posição do pico da linha, em regiões onde os campos de velocidade apresentam velocidades negativas. Isso indica que uma parcela das nuvens (aquelas que produzem as asas nas linhas) que produzem as linhas de emissão possuem uma cinemática distinta daquelas que produzem a maior parte da emissão (traçadas pelo pico das linhas de emissão).

Por fim, os mapas para o momento de Gauss-Hermite h_4 apresentam valores iguais ou maiores do que zero em praticamente todo o campo, para todas as linhas de emissão, indicando que os perfis observados para as linhas de emissão são mais pontiagudos do que uma Gaussiana, ou ainda, que há uma sobreposição de duas componentes Gaussianas: uma componente larga e uma componente estreita sobreposta à primeira. Observamos alguns valores negativos em algumas regiões, porém menores em módulo do que os valores de h_3 . A interpretação é de que, além de desvios assimétricos, há também desvios simétricos.

Embora o ajuste por séries de Gauss-Hermite reproduza bem os perfis observados das linhas de emissão em algumas posições da galáxia, os altos valores absolutos de h_3 e h_4 indicam a presença de mais de uma componente cinemática. Estas componentes podem ser separadas através do ajuste de múltiplas funções Gaussianas, possibilitando a análise da origem de cada uma delas. Sendo assim, realizamos os ajustes utilizando duas funções Gaussianas para cada linha de emissão, as quais se mostraram suficientes para uma boa representação dos perfis observados.

Figura 4.2 – Mapas das distribuições de fluxo, dos campos de velocidade, das dispersões de velocidade e dos momentos h_3 e h_4 , obtidos pelo ajuste de séries de Gauss-Hermite.



4.2.2 Ajustes por curvas Gaussianas

Como discutido acima, a análise dos resultados obtidos a partir dos ajustes dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite indica a presença de uma componente cinemática adicional, além da componente de rotação do disco. A fim de separar as duas componentes cinemáticas, realizamos os ajustes utilizando duas curvas Gaussianas para cada linha de emissão. Denominaremos uma delas como componente estreita, a qual representa a emissão do gás no disco, e a outra como componente larga, representando a emissão adicional. Durante o ajuste, incluímos o vínculo de que a componente larga deve ter uma dispersão de velocidades maior do que a componente estreita. Quando ajustamos duas componentes cinemáticas, estamos supondo a existência de dois conjuntos de nuvens de gás na galáxia, que possuem distribuições de velocidades diferentes entre si. A escolha de curvas Gaussianas para o ajuste supõe que cada conjunto de nuvens segue uma distribuição de velocidades Maxwelliana. Sendo assim, as componentes larga e estreita de uma mesma linha de emissão têm origens físicas diferentes.

Na Figura 4.3 apresentamos mapas bidimensionais das distribuições de fluxo obtidos para cada componente para as linhas de emissão $[O\ III]\lambda 5007$, $H\alpha$, $[N\ II]\lambda 6583$ e $[S\ II]\lambda 6731$, de cima para baixo, respectivamente. A primeira coluna corresponde à componente Gaussi-

ana estreita e a segunda coluna corresponde à componente larga. Os fluxos são mostrados em unidades logarítmicas de $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{spaxel}^{-1}$ e as regiões em cinza correspondem a locais mascarados, onde as amplitudes das linhas de emissão em questão são menores do que 3σ do contínuo adjacente. Todos os mapas, tanto para a componente estreita quanto para a componente larga, apresentam o pico de emissão no núcleo. Para a componente estreita, a emissão é estendida por todo o campo. Além disso, novamente podemos identificar uma região com níveis de fluxos intermediários a noroeste do núcleo e no extremo leste, originada possivelmente pela emissão de regiões de formação estelar. Esta estrutura é mais facilmente identificada nos mapas de fluxos para as linhas do $\text{H}\alpha$ e $[\text{S II}]\lambda 6717$. A componente larga, por sua vez, apresenta mapas de fluxos mais compactos, com a maior extensão observada para a linha $[\text{N II}]\lambda 6583$, onde observa-se emissão estendida até cerca de $1.5''$ do núcleo, correspondente a 1.27 kpc na galáxia.

Na Figura 4.4 apresentamos os campos de velocidade para as linhas de emissão ajustadas, onde a primeira coluna corresponde à componente Gaussiana estreita e a segunda coluna corresponde à componente larga. Os campos de velocidade estão em unidades de km s^{-1} e a velocidade sistêmica da galáxia foi subtraída. Na componente estreita, podemos observar claramente um padrão de rotação em $\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]\lambda 6583$ e $[\text{S II}]\lambda 6717$, com *redshifts* a oeste do núcleo e *blueshifts* a leste, e amplitudes de cerca de 200 km s^{-1} , semelhante ao resultado obtido a partir dos ajustes das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite. Além disso, o mapa para a linha $[\text{O III}]\lambda 5007$ também sugere um padrão de rotação semelhante, porém com amplitudes bem mais baixas em relação às outras linhas, de cerca de 50 km s^{-1} . Os campos de velocidade para a componente larga estão todos em *blueshift*, apenas com velocidades negativas, com valores de $\sim -500 \text{ km s}^{-1}$ para as linhas $\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]\lambda 6583$ e $[\text{S II}]\lambda 6717$ e de $\sim -800 \text{ km s}^{-1}$ para o $[\text{O III}]\lambda 5007$. Esse resultado sugere que a componente larga é produzida por um *outflow* a partir do núcleo da galáxia.

Na Figura 4.5 estão os mapas bidimensionais das dispersões de velocidade para as linhas de emissão ajustadas, sendo a coluna da esquerda correspondente à componente Gaussiana estreita e a coluna da direita correspondente à componente larga. As dispersões de velocidade estão em unidades de km s^{-1} . A componente estreita apresenta valores abaixo de 200 km s^{-1} em todo o campo, com os maiores valores sendo observados no núcleo e os menores valores, de $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$, observados a distâncias maiores do que $1''$ do núcleo, principalmente em regiões coespaciais com a estrutura atribuída a um braço espiral/anel parcial vista nos mapas de fluxos, mencionada anteriormente. Os mapas de dispersões de velocidade para a componente larga apresentam valores mais altos em relação à componente estreita, entre ~ 500 e 650 km s^{-1} para as linhas $\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]\lambda 6583$ e $[\text{S II}]\lambda 6717$, e de cerca de $\sim 250 \text{ km s}^{-1}$ para o $[\text{O III}]\lambda 5007$.

Os resultados apresentados nesta seção indicam que a cinemática do gás na região central, em $3 \text{ kpc} \times 4.2 \text{ kpc}$, da galáxia IRAS 09320+6134 pode ser interpretada como sendo originada por duas componentes: a primeira é uma componente estreita, que traça a emissão do gás localizado no plano do disco da galáxia, com campos de velocidade compatíveis com o

que é esperado para um disco em rotação, além de baixas dispersões de velocidade. A segunda componente, uma componente larga, é originada devido a *outflows* de gás ionizado a partir do núcleo galáctico. A componente larga está toda em *blueshift* em relação à componente estreita e apresenta valores mais altos, em módulo, tanto de velocidades quanto de dispersões de velocidade.

Figura 4.3 – Distribuições de fluxo obtidos por ajustes de curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão. A primeira coluna corresponde à componente Gaussiana estreita e a segunda coluna corresponde à componente larga. Os fluxos são mostrados em unidades logarítmicas de $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{spaxel}^{-1}$.

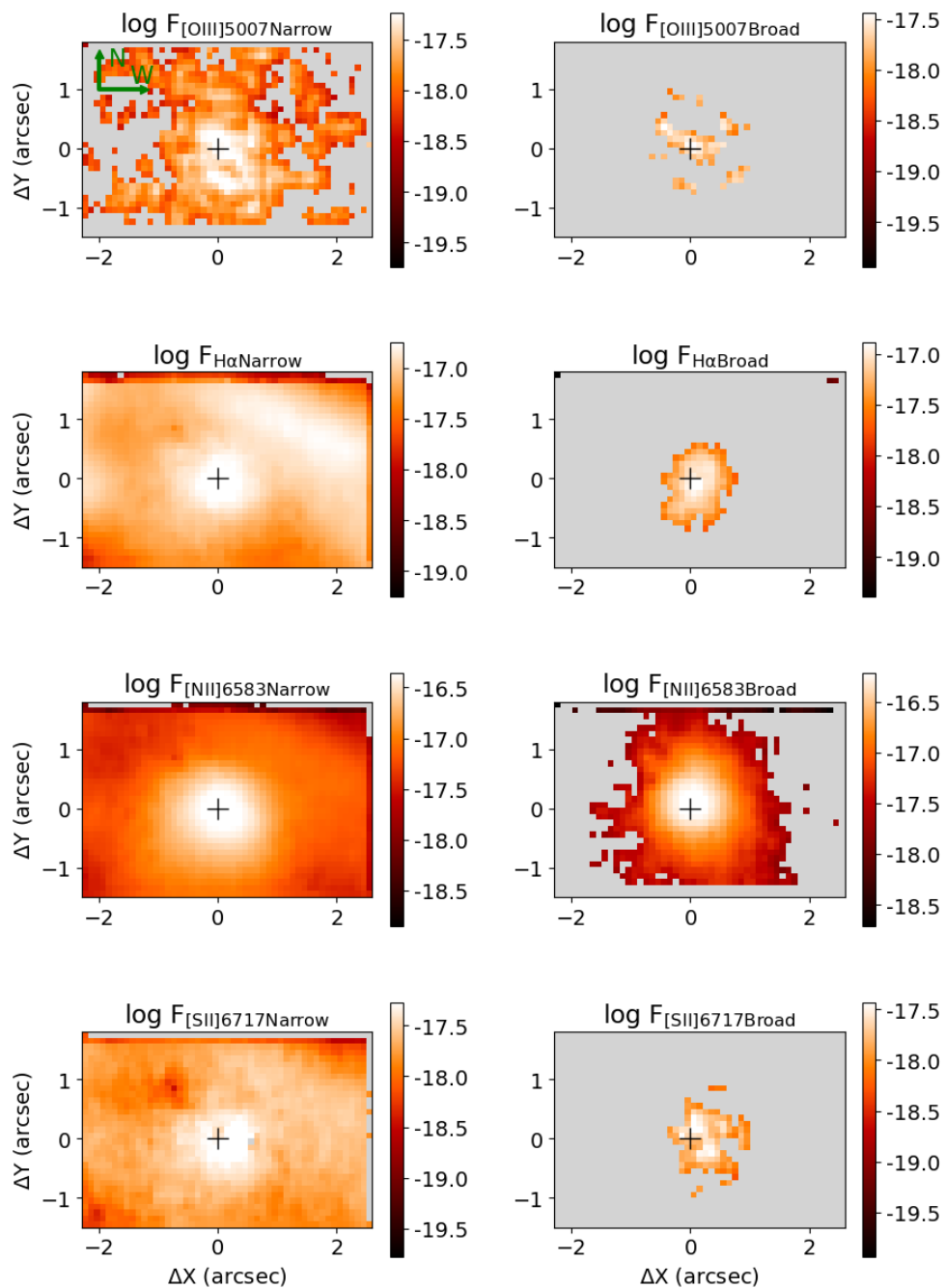


Figura 4.4 – Mapas dos campos de velocidade obtidos por ajustes de curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão. A primeira coluna corresponde à componente Gaussiana estreita e a segunda coluna corresponde à componente larga. Os campos de velocidade estão em unidades de km s^{-1} .

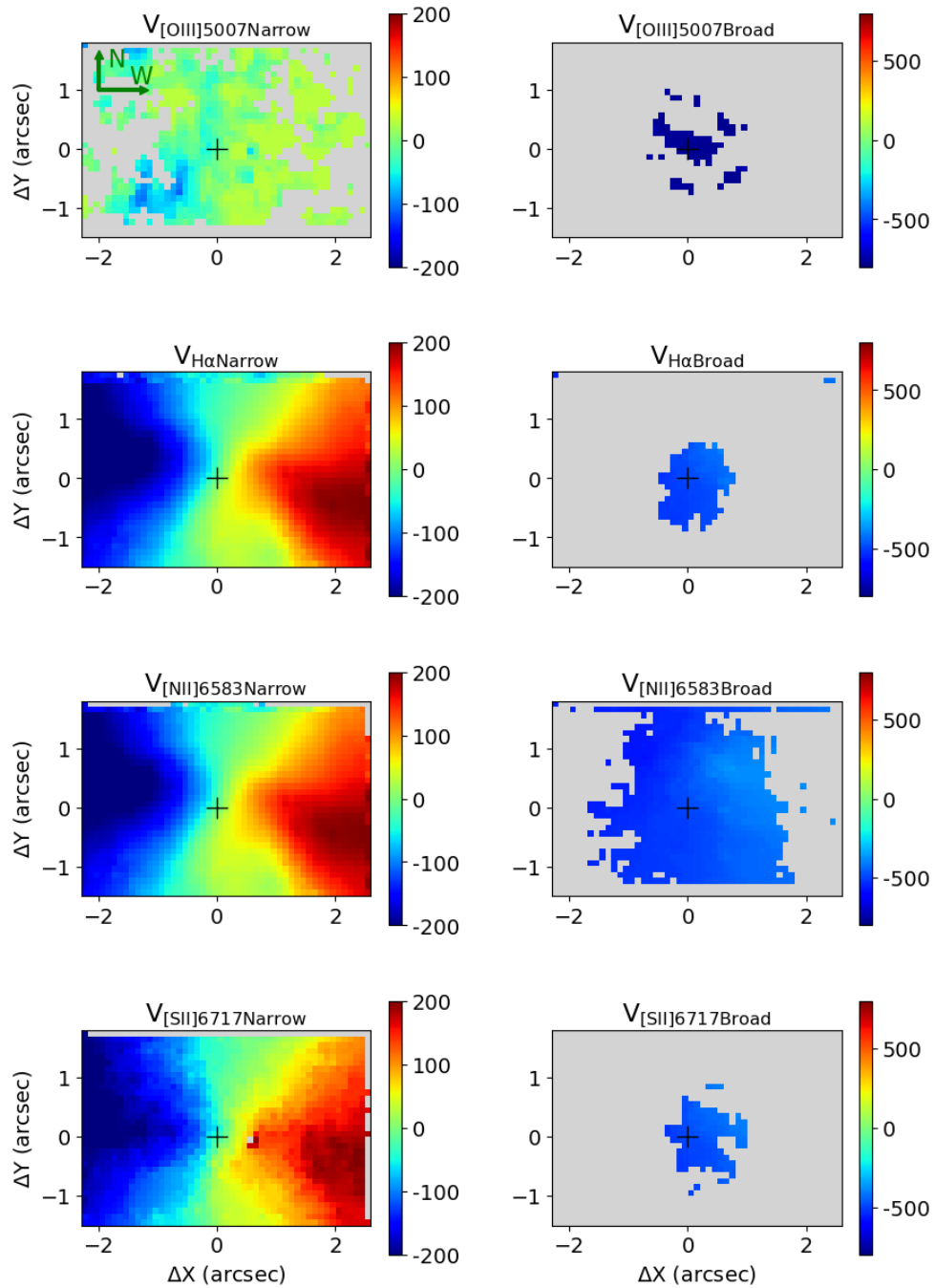
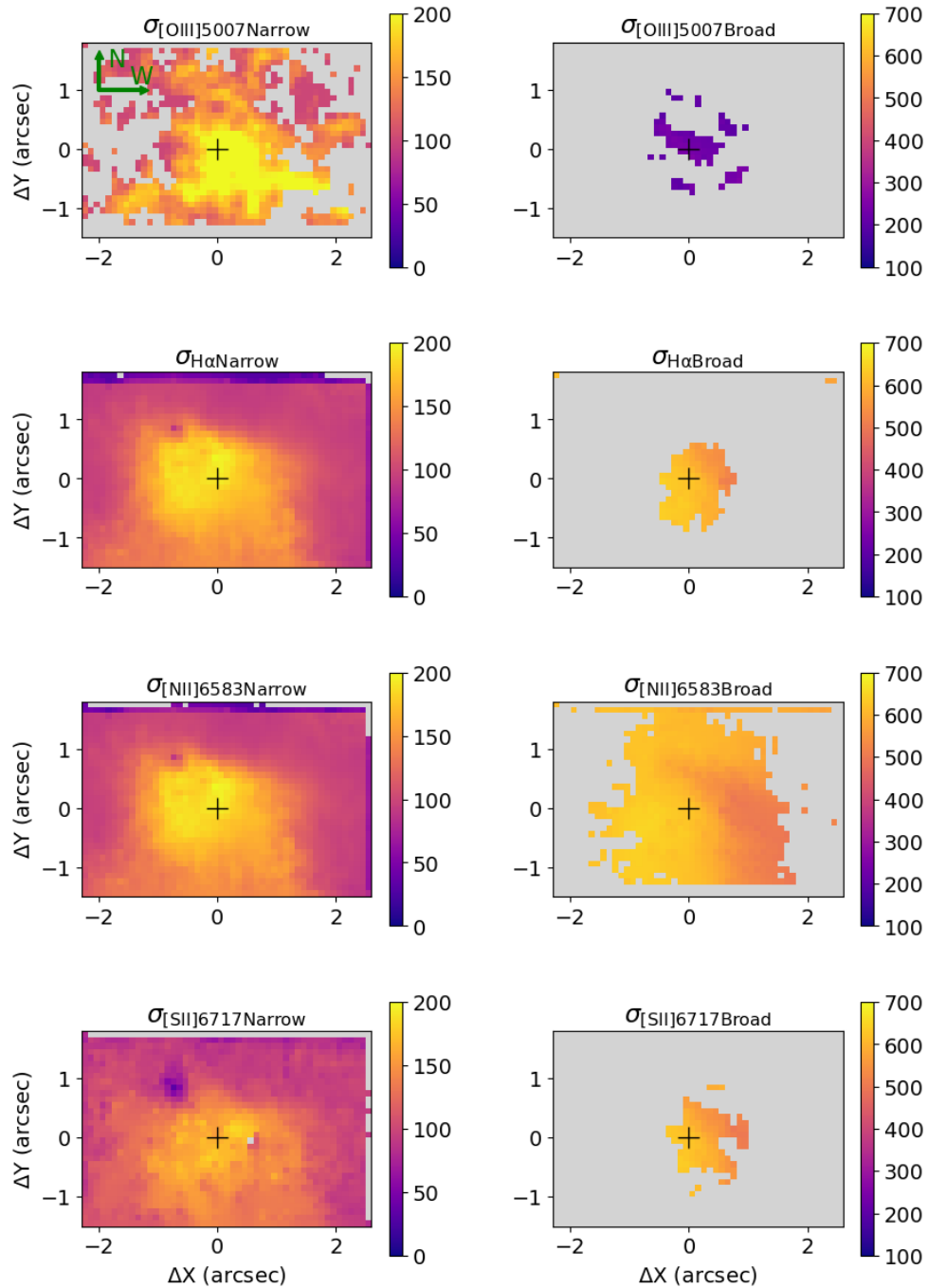


Figura 4.5 – Mapas das dispersões de velocidade obtidos por ajustes de curvas Gaussianas aos perfis das linhas de emissão. A coluna da esquerda correspondente à componente Gaussiana estreita e a coluna da direita correspondente à componente larga. As dispersões de velocidade estão em unidades de km s^{-1} .

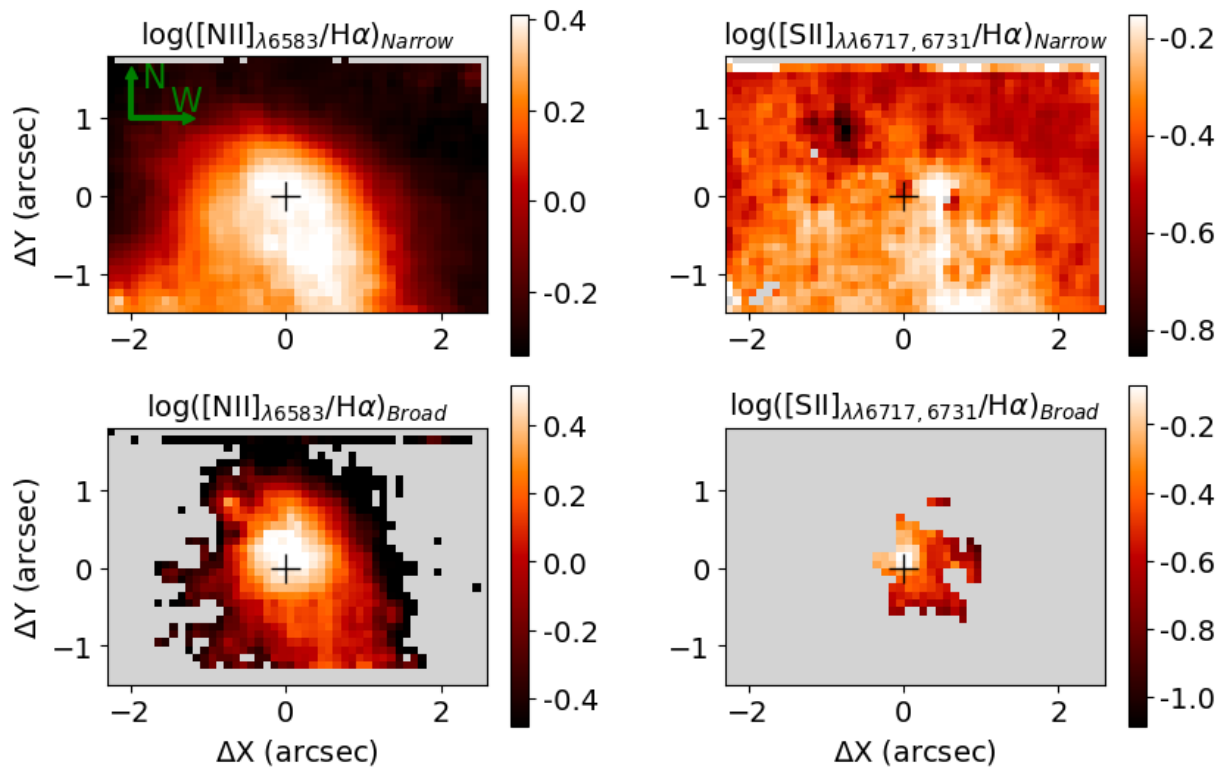


4.3 MAPAS DE RAZÕES DE INTENSIDADES DE LINHAS DE EMISSÃO

A Figura 4.6 mostra mapas de razões de intensidades de linhas de emissão para as componentes estreita, acima, e larga, abaixo. Na coluna à esquerda, são mostradas, em uni-

dades logarítmicas, razões de $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$, e na coluna à direita, são mostradas razões de $[\text{S II}]\lambda\lambda 6717, 6731/\text{H}\alpha$. Para a componente estreita, temos que o mapa de razão $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$ possui valores entre ~ -0.1 e 0.4 , enquanto o mapa de razão $[\text{S II}]\lambda\lambda 6717, 6731/\text{H}\alpha$ apresenta apenas valores negativos, entre ~ -0.8 e -0.2 . Observamos que, para esta componente, ambos os mapas de razões apresentam os maiores valores na região nuclear, estendendo-se para o sul, e apresentam os menores valores em uma região circumnuclear que vai desde o extremo leste até o extremo oeste no sentido horário, englobando a região onde detectamos um braço espiral da galáxia e consistente com o esperado de que valores pequenos representam a presença de formação estelar. Para a componente larga, temos que o mapa de razão $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$ possui valores entre ~ -0.4 e 0.5 , enquanto o mapa de razão $[\text{S II}]\lambda\lambda 6717, 6731/\text{H}\alpha$ apresenta novamente apenas valores negativos, entre ~ -1.1 e -0.3 . Para essa componente, observada predominantemente interna a $\sim 1.2''$ do campo, ou seja, na região nuclear, observamos apenas valores mais elevados.

Figura 4.6 – Mapas para razões de intensidades de linhas de emissão para as componentes estreita, acima, e larga, abaixo. Na coluna à esquerda, são mostradas, em unidades logarítmicas, razões de $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$, e na coluna à direita, são mostradas razões de $[\text{S II}]\lambda\lambda 6717, 6731/\text{H}\alpha$.

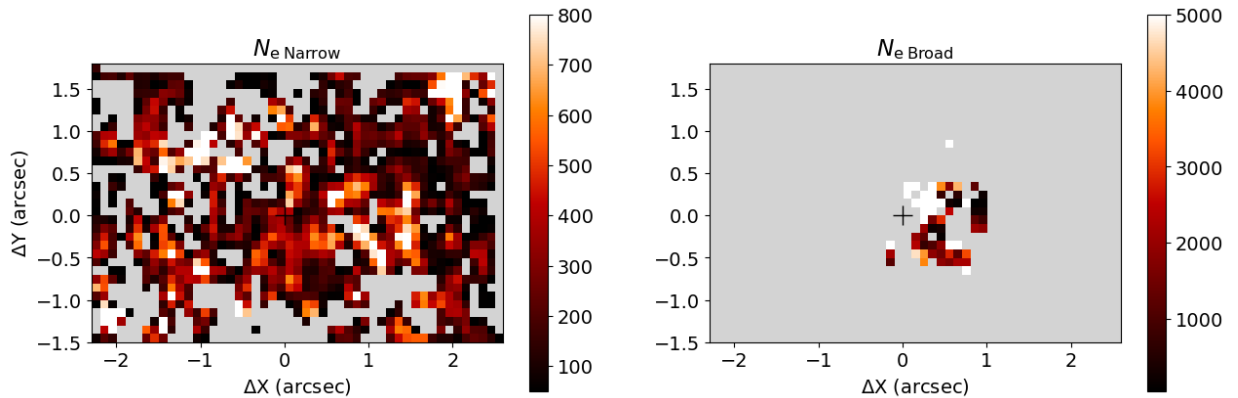


A Figura 4.7 mostra os mapas de densidade para a componente estreita, à esquerda, e para a componente larga, à direita. As densidades eletrônicas estão em unidades de número de elétrons por cm^3 e foram derivadas a partir das razões de linha de $[\text{S II}]\lambda 6716/6731$, considerando uma temperatura eletrônica de $T_e = 15000 \text{ K}$, que é um valor típico observado para

galáxias ativas (RIFFEL et al., 2021; DORS et al., 2017).

Embora os mapas sejam bastante ruidosos, a análise nos permite observar algo muito evidente: a densidade eletrônica obtida para a componente larga, correspondente ao *outflow*, é cerca de dez vezes maior do que os valores obtidos para a componente estreita, referente ao gás no disco da galáxia. A densidade eletrônica do gás em *outflow* deve ser ainda maior do que o valor observado, uma vez que as linhas do [S II] são produzidas em uma região parcialmente ionizada, enquanto que o *outflow* é associado a um gás totalmente ionizado, o qual possui uma densidade maior (DAVIES et al., 2020). Sendo assim, provavelmente os valores de densidade eletrônica do *outflow* detectado são ainda maiores e os valores observados no mapa para a componente larga devem representar um limite inferior.

Figura 4.7 – Mapas de densidade eletrônica para a componente estreita, à esquerda, e para a componente larga, à direita. As densidades eletrônicas estão em unidades de número de elétrons por cm^3 .



5 DISCUSSÕES

Neste capítulo discutimos os resultados apresentados no capítulo anterior. Usando diagramas de diagnóstico baseados nos fluxos das linhas de emissão, estudamos os mecanismos de excitação do gás, discutimos a cinemática do gás, determinamos as propriedades dos *outflows* e, finalmente, comparamos com resultados da literatura para galáxias já estudadas no projeto.

5.1 MECANISMO DE EXCITAÇÃO DO GÁS

5.1.1 Diagrama de diagnóstico BPT

A Figura 5.1 mostra o diagrama de diagnóstico BPT para a componente estreita. O diagrama foi construído a partir de razões de intensidades das linhas $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$ vs. $\log([\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha)$ e divide-se em quatro partes. A curva tracejada e a curva contínua, propostas por Kauffmann et al. (2003) e Kewley et al. (2001) respectivamente, representam a divisão entre galáxias com atividade Starburst, ou seja, com intensa formação estelar, e AGNs. À esquerda da curva proposta por Kauffmann et al. (2003) localizam-se as Starbursts e à direita da curva proposta por Kewley et al. (2001) localizam-se os AGNs. Há ainda uma região intermediária entre essas curvas correspondente aos objetos de transição (TOs). A linha pontilhada, proposta por Schawinski et al. (2007), divide AGNs entre Seyferts e LINERs.

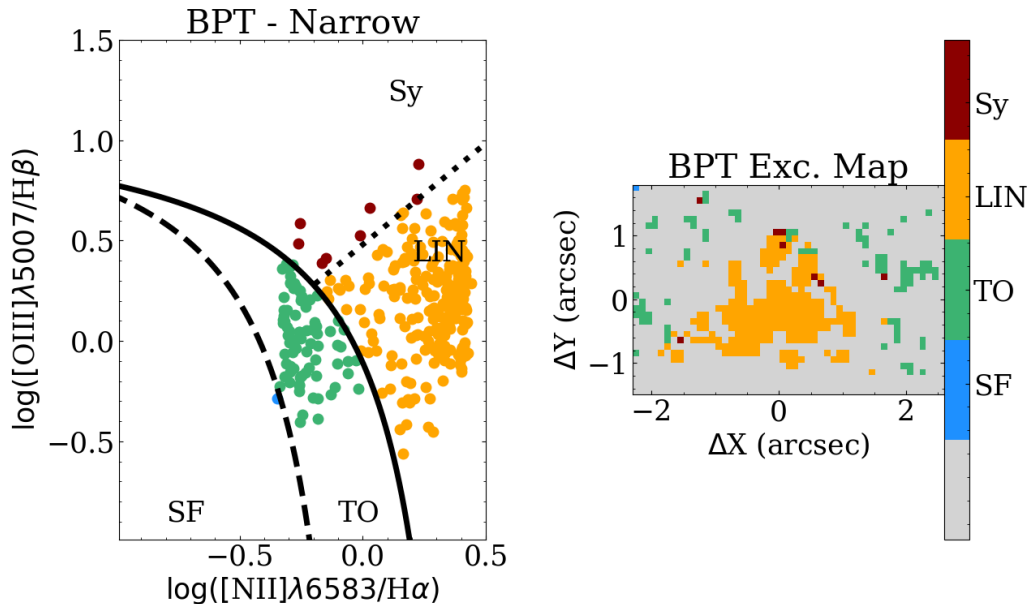
Podemos observar que a maioria dos pontos concentram-se na região de LINERs, indicando que o mecanismo de ionização do gás no disco da galáxia é, possivelmente, devido a um AGN. Além disso, os pontos verdes, observados na região de objetos de transição, correspondem a uma região da galáxia onde observamos valores elevados nos mapas de distribuições de fluxo, da Figura 4.3, o que é condizente, tendo em vista que uma possível interpretação para essa região é de que seja um braço espiral da galáxia, onde há formação estelar.

Não foi possível construir um diagrama de diagnóstico BPT referente à componente larga em virtude dos poucos spaxels detectados para essa componente, principalmente referentes às linhas $\text{H}\beta$ e $[\text{O III}]\lambda 5007$.

5.1.2 Diagramas de diagnóstico WHAN

A Figura 5.2 mostra os diagramas de diagnóstico WHAN para a componente estreita, acima, e a componente larga, abaixo. O diagrama foi construído a partir da razão de intensidade dos fluxos de $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ vs. a largura equivalente $\text{EWH}\alpha$ e, semelhante ao diagrama BPT,

Figura 5.1 – Diagrama BPT para a componente estreita das linhas, identificada como sendo devido à emissão de gás localizado no disco da galáxia. Os pontos representam as razões de linhas para cada spaxel e as linhas representam os limites de separação entre os diferentes mecanismos de ionização do gás, de Kewley et al. (2001) (linha contínua), Kauffmann et al. (2003) (linha tracejada) e Schawinski et al. (2007) (linha pontilhada).



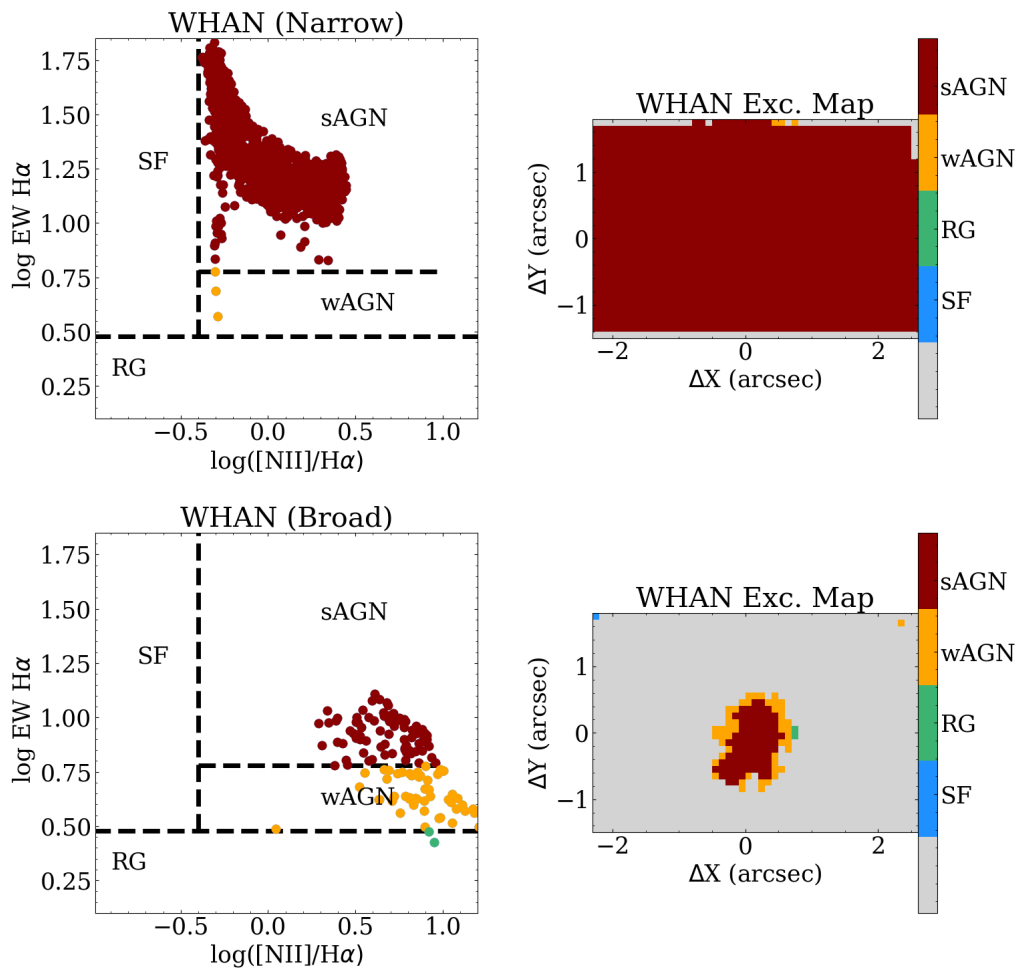
também divide-se em quatro partes. No retângulo à extrema esquerda localizam-se as galáxias Starbursts (SF) que fazem divisa com os AGNs, na esquerda. A região de AGNs, por sua vez, divide-se em dois retângulos, onde o superior corresponde aos AGNs fortes (sAGN) e o inferior corresponde aos AGNs fracos (wAGN). Por fim, na parte de baixo tem-se ainda um outro retângulo correspondente às galáxias aposentadas ou falsos AGNs (RG).

Para a componente estreita, que traça a emissão do gás no disco da galáxia, observamos que praticamente todos os pontos do gráfico encontram-se na região de AGNs fortes. Juntamente com o resultado obtido para o diagrama BPT, onde a maioria dos pontos estão na região ocupada por LINERs, podemos concluir que a excitação do gás do disco é devido ao campo de radiação do AGN central.

Diferentemente do diagrama BPT, que precisa de quatro linhas de emissão para ser construído, o diagrama WHAN precisa apenas de duas linhas, a do $\text{H}\alpha$ e a do $[\text{N II}]\lambda 6584$. Por essa razão, foi possível construir também o diagrama de diagnóstico WHAN para a componente larga, pois as linhas de emissão do $\text{H}\alpha$ e do $[\text{N II}]\lambda 6584$ são bem expressivas em todo o campo da galáxia observado. Para esta componente, interpretada como sendo devido a um *outflow* de gás ionizado, os pontos do gráfico caíram nas regiões de AGNs fortes e fracos, com os pontos mais próximos ao núcleo estando na região ocupada por AGNs fortes no diagrama WHAN. Isso indica que a ionização da emissão do gás em *outflow* também é devido ao campo de radiação do AGN. Analisando os resultados de ambos os diagramas de diagnóstico, BPT e WHAN, interpretamos, portanto, que o mecanismo de ionização de ambas as componentes cinemáticas,

disco e *outflow*, da galáxia IRAS 09320+6134 é devido a um AGN.

Figura 5.2 – Diagramas WHAN para a componente estreita, acima, e para a componente larga, abaixo. Os pontos representam as razões de linhas para cada spaxel e as linhas representam os limites de separação entre os diferentes mecanismos de ionização do gás.



5.2 OUTFLOW

Os *outflows*, provenientes de um núcleo ativo de galáxia, podem desempenhar um importante papel no comportamento e evolução das galáxias, pois representam um dos mecanismos pelos quais o buraco negro supermassivo central interage com sua galáxia hospedeira. A interação dos *outflows* com o gás da galáxia, seja motivando a redistribuição do gás ou ocasionando a sua expulsão, podem regular a taxa de formação estelar na mesma, estimulando ou cessando o surgimento de novas estrelas.

A fim de analisar a interação do *outflow* de gás ionizado detectado com a sua galáxia hospedeira IRAS 09320+6134, estimamos a taxa de massa em *outflow*, ou seja, a razão entre a massa de gás ionizado em *outflow* e o tempo dinâmico para o gás atingir sua posição atual. A massa de gás ionizado em *outflow* é dada por

$$M_g = N_e m_p V f, \quad (5.1)$$

onde N_e é a densidade eletrônica, m_p é a massa do próton, V é o volume da região onde o *outflow* foi detectado e está contido e f é o fator de *filling*, isto é, o fator de preenchimento, que pode ser estimado a partir da luminosidade do $H\alpha$ emitida dentro do volume V , usando a equação

$$L_{H\alpha} \approx f N_e^2 j_{H\alpha}(T) V, \quad (5.2)$$

onde $j_{H\alpha}$ é o coeficiente de emissão dado por $j_{H\alpha}(T) = 3.3534 \times 10^{-25} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ (OSTERBROCK; FERLAND, 2006). Combinando as duas equações acima, temos que

$$M_g = \frac{m_p L_{H\alpha}}{N_e j_{H\alpha}(T)} \quad (5.3)$$

A luminosidade do $H\alpha$ pode ser obtida por $L_{H\alpha b} = F_{H\alpha b} 4\pi d^2$, onde $d = 175 \text{ Mpc}$ é a distância da galáxia e $F_{H\alpha b}$, por sua vez, pode ser obtido integrando o fluxo da componente larga de $H\alpha$ em todo o campo (Fig. 4.3). A densidade eletrônica N_e , da mesma forma, pode ser obtida a partir da mediana dos valores do mapa de densidade eletrônica para a componente larga, da Fig. 4.7. Sabendo que $m_p = 1.67 \times 10^{-24} \text{ g}$ e que os valores encontrados para a luminosidade da componente larga de $H\alpha$ e para a densidade eletrônica N_e foram de $L_{H\alpha b} \approx 2.93 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ e $N_e \approx 2160 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente, então temos que a massa de gás ionizado em *outflow* é

$$M_g \approx 6.76 \times 10^{33} \text{ kg} \approx 3.4 \times 10^3 M_\odot \quad (5.4)$$

onde $M_\odot = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ é a massa do Sol. Para estimar a taxa de massa em *outflow*, podemos estimar o tempo dinâmico assumindo um raio de $r \approx 1'' \approx 0.85 \text{ kpc}$, que é aproximadamente o raio da região onde a componente larga é observada (Fig. 4.3), e a velocidade do *outflow* de $v_o \approx 500 \text{ km s}^{-1}$, obtida diretamente do campo de velocidades da componente larga da linha $H\alpha$ (Fig. 4.4). Dessa forma, a taxa de massa em *outflow* é dada por

$$\dot{M}_g = \frac{M_g v_o}{r} \approx 1.29 \times 10^{20} \text{ kg s}^{-1} \approx 0.002 M_\odot \text{ ano}^{-1} \quad (5.5)$$

Agora, considerando a dispersão de velocidade da componente larga do $H\alpha$ (Fig. 4.5) como $\sigma \approx 600 \text{ km s}^{-1}$, podemos determinar a potência cinética \dot{E}_o do *outflow* como

$$\dot{E}_o = \frac{1}{2} \dot{M}_g (v_o^2 + 3\sigma_o^2) \approx 8.6 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1} \quad (5.6)$$

Sabendo que a luminosidade bolométrica pode ser obtida a partir da luminosidade do [O III], fazendo-se $L_{bol} = 3500L_{[OIII]}$ (HECKMAN et al., 2005), então, determinando $L_{[OIII]}$ do mesmo modo como foi obtida a luminosidade do $H\alpha$, temos que $L_{[OIII]} \approx 4.2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, de modo que $L_{bol} \approx 1.5 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$. Agora podemos comparar a potência cinética com a luminosidade bolométrica, definindo a eficiência de acoplamento cinético do *outflow*, fazendo

$$\frac{\dot{E}_o}{L_{bol}} \approx 5.9 \times 10^{-5}. \quad (5.7)$$

O valor encontrado para a eficiência cinética do *outflow* é bem menor do que o valor estimado por simulações cosmológicas para que o *outflow* seja eficiente em suprimir a formação estelar na galáxia hospedeira e, de fato, afetar a evolução da galáxia. Para o *outflow* atingir escalas de kpc e limpar eficientemente o gás frio do núcleo da galáxia, sua potência cinética \dot{E}_o deve ser pelo menos 0.5% da luminosidade bolométrica L_{bol} da galáxia (HARRISON et al., 2018; HOPKINS; ELVIS, 2010). Entretanto, há de se tomar cuidado na comparação entre observações e modelos, uma vez que os modelos sugerem que a maior parte da potência do *outflow* não é devido à transferência de energia cinética, mas sim devido à radiação emitida (HARRISON et al., 2018). Além disso, *outflows* são geralmente observados em múltiplas fases gasosas e a componente vista em gás ionizado representa somente uma parcela.

5.3 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS ANTERIORES

A galáxia IRAS 09320+6134 faz parte de uma amostra, juntamente com outras 14 galáxias [U]LIRGs com emissão megamaser de OH, de um projeto em andamento cujo objetivo geral é relacionar as propriedades do megamaser de OH e o estágio de fusão de sua galáxia hospedeira com possíveis atividades AGN e Starburst. Até o momento, seis galáxias OHM da amostra já foram estudadas em detalhes utilizando dados de IFU, complementados com imagens do HST e VLA. No primeiro estudo, Sales et al. (2015) apresentam resultados para a galáxia IRAS 16399-0937, um objeto em fusão em estágio médio para avançado, com 2 núcleos imersos em um envelope difuso, em um dos quais foi detectado um AGN embebido em poeira. No segundo estudo, Hekatelyne et al. (2018a) estudam a galáxia IRAS 23199+0123, um par de galáxias em interação, onde foi detectada a presença de um AGN em um dos núcleos e também foi descoberta e reportada uma nova emissão maser. Foi atribuída uma correlação entre as fontes maser e choques gerados por *outflows* provenientes do AGN. O terceiro estudo, Hekatelyne et al. (2018b), apresenta a galáxia IRAS 03056+2034, uma galáxia espiral barrada que possui estruturas irregulares e braços espirais flocculentos, indicativos de uma interação ocorrida no passado. Foi detectado um AGN central imerso em poeira e rodeado por um anel de regiões de formação estelar. No quarto estudo, Sales et al. (2019) apresentam resultados para a galáxia IRAS 17526+3253, uma grande fusão em estágio intermediário, que abriga masers

de OH e H₂O. A ionização do gás foi interpretada como sendo devido a regiões de formação estelar, sem conclusões definitivas a respeito da presença de um AGN, embora essa possibilidade não possa ser descartada apenas com a análise dos dados obtidos. No quinto e penúltimo estudo, Hekatelyne et al. (2020) apresentam a galáxia IRAS 11506-3851, uma galáxia espiral isolada sem claros sinais de interação, mas com uma estrutura de duas barras. Foi detectada a presença de um AGN fraco imerso em uma região dominada por formação estelar ao redor do núcleo, e ainda a presença de um modesto *outflow* proveniente do AGN. O último e mais recente estudo, ainda em processo de publicação, (Hekatelyne et al., submetido), apresenta a galáxia IRAS 19154+2704, uma galáxia irregular com claros sinais de interação, mas aparentemente com apenas um núcleo, indicando que a interação está em um estágio avançado e foi, provavelmente, o gatilho para o AGN detectado na galáxia. Este foi o terceiro objeto da amostra onde foi detectada a presença de *outflow*, mas foi a primeira galáxia onde foi possível estudar este *outflow* de altas velocidades mais a fundo, pois foi o *outflow* mais intenso detectado até então das galáxias já estudadas.

Em resumo, portanto, das seis galáxias estudadas até o momento, cinco indicam claramente a presença de um AGN e parece haver um padrão de regiões de formação estelar ao redor do núcleo, em escalas de alguns kpc, na maioria destes objetos. Além disso, todas as galáxias apresentam assinaturas de interação, sendo que três delas estão em processo de fusão e as outras três parecem ser o resultado de uma fusão ocorrida em um passado recente. Em três das seis galáxias estudadas foram detectados *outflows* de gás ionizado.

No presente estudo, apresentamos uma análise da cinemática e excitação do gás na galáxia IRAS 09320+6134, uma galáxia com sinais de interação passada, na qual detectamos claramente a presença de um AGN. O AGN é responsável tanto pela emissão do gás no disco da galáxia, como pela emissão do gás em *outflow* detectado. Sendo assim, os resultados deste estudo aumentam a lista de AGNs detectados de cinco para seis, além de aumentar a detecção de *outflows* de três para quatro.

Embora nossa amostra de galáxias com emissão megamaser de OH estudadas ainda seja relativamente pequena, somando sete objetos com o presente estudo, é possível identificar uma tendência da presença de AGNs nas galáxias em estágios mais avançados de fusão ou com fusões já concluídas. Além disso, os impactos do AGN na galáxia hospedeira, como a presença dos *outflows*, por exemplo, também são mais evidentes e mais intensos nestes objetos com processo de interação mais avançado, se comparados com a contribuição de formação estelar nestes objetos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, realizamos um mapeamento bidimensional da distribuição, cinemática e excitação do gás na região central, em $3 \text{ kpc} \times 4.2 \text{ kpc}$, da galáxia megamaser de OH IRAS 09320+6134, a partir de ajustes dos perfis das linhas de emissão presentes nos espectros da galáxia. Os principais resultados obtidos foram:

- Foi feito um ajuste dos perfis das linhas de emissão por séries de Gauss-Hermite que, embora tenha reproduzido razoavelmente os perfis observados em algumas posições da galáxia, indicou a presença de mais de uma componente cinemática que, por sua vez, podem ser separadas através de múltiplas funções Gaussianas;
- Foram ajustadas, portanto, duas curvas Gaussianas para cada linha de emissão e este mostrou-se um bom modelo dos perfis observados em todas as posições da galáxia mapeadas. Uma das componentes Gaussianas é estreita, com valores de dispersões de velocidade entre ~ 50 e 200 km s^{-1} , e a outra componente Gaussiana é larga, com valores de dispersões de velocidade de $\sim 250 \text{ km s}^{-1}$ para o [O III] $\lambda 5007$ e entre ~ 500 e 650 km s^{-1} para o restante das linhas;
- A componente estreita está traçando o gás em emissão no disco da galáxia, e a velocidade dessa componente mostra claramente um disco em rotação, com uma amplitude de $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$ para todas as linhas, exceto para o [O III] $\lambda 5007$, que apresenta uma amplitude de $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$;
- A componente larga está toda em *blueshift* em relação à componente estreita e à velocidade sistêmica da galáxia e apresenta apenas velocidades negativas, de $\sim -800 \text{ km s}^{-1}$ para o [O III] $\lambda 5007$ e $\sim -500 \text{ km s}^{-1}$ para o restante das linhas. Além disso, ela é observada predominantemente interna a $1''$ do núcleo da galáxia, por isso, e por ser uma componente larga e estar em *blueshift*, interpretamos esta componente como sendo devido a um *outflow* de gás ionizado proveniente do núcleo ativo da galáxia, sendo que só vemos a parte do gás que está na nossa direção;
- Os mapas de densidade eletrônica apresentam valores aproximadamente dez vezes mais altos para a componente larga em relação à componente estreita, como é esperado para *outflows*. Acreditamos que os valores de densidade eletrônica referentes à componente larga sejam ainda maiores, tendo em vista que as linhas do [S II], utilizadas para o cálculo da densidade eletrônica, são produzidas em uma região parcialmente ionizada, enquanto que o *outflow* é associado a um gás totalmente ionizado;
- Ambos os diagramas de diagnóstico BPT e WHAN para a componente estreita, que traça a emissão do gás no disco da galáxia, indicam ionização do gás por um núcleo ativo de

galáxia. Para a componente larga foi possível construir somente o diagrama WHAN, que igualmente sugere que a ionização do *outflow* é predominantemente devido a um AGN;

- Foi detectado um *outflow* de gás ionizado proveniente do AGN da galáxia. A taxa de massa em *outflow* foi determinada em $\dot{M}_g \approx 0.002 M_\odot \text{ano}^{-1}$. Além disso, analisando a eficiência de acoplamento cinético do *outflow*, de $\sim 5.9 \times 10^{-5}$, concluímos que ele não é eficiente em suprimir a formação estelar de sua galáxia hospedeira, embora tenhamos que ter cuidado com essa análise, uma vez que os modelos sugerem que a maior parte da potência do *outflow* não é devido à transferência de energia cinética, mas sim devido à radiação emitida.

De maneira geral, nosso estudo da cinemática e excitação do gás em galáxias com emissão megamaser de OH, tanto referente à galáxia IRAS 09320+6134 quanto às outras galáxias estudadas até então, tem mostrado uma conexão entre esses objetos e a presença de atividade AGN, diferentemente do que se pensava, isto é, de que galáxias com megamaser de OH são majoritariamente associadas à presença de atividade Starburst. O que temos observado é que em galáxias onde o estágio de fusão não é tão avançado, de fato quem domina a ionização são Starbursts, frequentemente encontradas em regiões circumnucleares. Contudo, para as galáxias em estágios mais avançados de fusão, como é o caso da IRAS 09320+6134, a atividade AGN mostra-se dominante do mecanismo de ionização do gás na galáxia, em alguns casos inclusive forte o suficiente para ocasionar *outflows* de gás ionizado que, por sua vez, atrapalham o processo de formação estelar em regiões mais próximas ao núcleo, embora ainda seja possível a ocorrência de formação estelar em regiões um pouco mais afastadas.

6.2 PERSPECTIVAS

O estudo da galáxia megamaser de OH IRAS 09320+6134 nos possibilitou uma análise satisfatória sobre a cinemática e excitação do gás neste objeto, mas ainda é possível aperfeiçoar os resultados. Sabemos que nestas galáxias em interação é bastante comum a presença de poeira interestelar em grandes quantidades que, por sua vez, espalha e absorve radiação. Esse fenômeno é conhecido como extinção e pode ser corrigido, de modo a termos resultados mais fidedignos. Além disso, embora nossos resultados até o momento nos permitam concluir a respeito de uma conexão, que parece estar diretamente ligada ao estágio de fusão das galáxias, entre as galáxias com megamaser de OH e as atividades AGN e Starburst, a amostra de objetos estudados ainda é relativamente pequena do ponto de vista estatístico. Desse modo, é importante e necessário dar continuidade ao projeto, analisando e estudando detalhadamente a cinemática e excitação do gás das outras galáxias da amostra e incluindo nesta análise os dados do HST e do VLA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLINGTON-SMITH et al. Integral Field Spectroscopy with the Gemini Multiobject Spectrograph. I. Design, Construction, and Testing. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 114, p. 892–912, 2002.
- BAAN; HASCHICK. The peculiar galaxy IC 4553 : VLA-A observations of the OH megamaser. **Astrophysical Journal**, v. 279, p. 541–549, 1984.
- BAAN; SALZER; LEWINTER. Optical Classification of Megamaser Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 509, p. 633–645, 1998.
- BAAN; WOOD; HASCHICK. Broad hydroxyl emission in IC 4553. **The Astrophysical Journal**, v. 260, p. 49–52, 1982.
- BALDWIN; PHILLIPS; TERLEVICH. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. **Astronomical Society of the Pacific**, v. 93, p. 5–19, 1981.
- BEICHMAN, C. A. et al. **Infrared Astronomical Satellite (IRAS) Catalogs and Atlases: Explanatory supplement**. Washington, D.C.: NASA Reference Publication, 1988. v. 1, 466 p.
- CAPPELLARI; EMSELLEM. Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 138–147, 2004.
- CASTANEDA; VILCHEZ; COPETTI. Density studies on giant extragalactic hii regions. **Astronomy and Astrophysics**, v. 260, p. 370–380, 1992.
- DARLING; GIOVANELLI. A Search for OH Megamasers at $z > 0.1$. I. Preliminary Results. **The Astronomical Journal**, v. 119, p. 3003–3014, 2000.
- _____. A Search for OH Megamasers at $z > 0.1$. III. The Complete Survey. **The Astronomical Journal**, v. 124, p. 100–126, 2002.
- _____. Optical Spectral Classification of Major Mergers: OH Megamaser Hosts versus Nonmasing (Ultra)Luminous Infrared Galaxies. **The Astronomical Journal**, v. 132, p. 2596–2617, 2006.
- DAVIES et al. Ionized outflows in local luminous AGN: what are the real densities and outflow rates? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 498, p. 4150–4177, 2020.
- DORS et al. New quantitative nitrogen abundance estimations in a sample of Seyfert 2 active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 468, p. L113–L117, 2017.
- EINSTEIN. Zur Quantentheorie der Strahlung (On the Quantum Theory of Radiation). **Physika Zeitschrift**, v. 18, p. 121–128, 1917.
- ELITZUR. **Astronomical Masers**. United States of America: Springer, 1992. 351 p.
- FERNANDES et al. A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 413, p. 1687–1699, 2011.
- GATTO; SALES. O estudo espectroscópico no óptico da galáxia luminosas no infravermelho com emissão de megamaser de hidroxila IRAS 15587+1609. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, p. 127–136, 2021.
- GERHARD. Line-of-sight velocity profiles in spherical galaxies: breaking the degeneracy between anisotropy and mass. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 265, p. 213–230, 1993.

- GONCALVES; VERON-CETTY; VERON. AGNs with composite spectra. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 135, p. 437–466, 1999.
- HARRISON et al. AGN outflows and feedback twenty years on. **Nature Astronomy**, v. 2, p. 198–205, 2018.
- HECKMAN et al. The Relationship of Hard X-Ray and Optical Line Emission in Low-Redshift Active Galactic Nuclei. **The Astrophysical Journal**, v. 634, p. 161–168, 2005.
- HEKATELYNE et al. Gemini IFU, VLA and HST observations of the OH Megamaser galaxy IRASF23199+0123: the hidden monster and its outflow. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 474, p. 5319–5329, 2018a.
- _____. Star formation and gas inflows in the OH Megamaser galaxy IRAS03056+2034. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 2018b.
- _____. The OH Megamaser galaxy IRAS11506-3851: an AGN and star formation revealed by multiwavelength observations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 498, p. 2632–2644, 2020.
- HOOK et al. The Gemini–North Multi-Object Spectrograph: Performance in Imaging, Long-Slit, and Multi-Object Spectroscopic Modes. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 425–440, 2004.
- HOPKINS; ELVIS. Quasar feedback: more bang for your buck. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 401, p. 7–14, 2010.
- HOU; WU; HAN. Ultra-luminous infrared galaxies in sloan digital sky survey data release 6. **The Astrophysical Journal**, v. 704, 2009.
- HUANG et al. Oh megamasers: dense gas & the infrared radiation field. **Journal of Astrophysics and Astronomy**, v. 39, 2018.
- HUBBLE. Extragalactic nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 64, p. 321–369, 1926.
- IMANISHI et al. X-Ray Evidence of a Buried Active Galactic Nucleus in UGC 5101. **The Astrophysical Journal**, v. 596, p. L167–L170, 2003.
- KABATH; JONES; SKARKA. **Reviews in Frontiers of Modern Astrophysics: From space debris to cosmology.** [S.l.]: Springer Cham, 2020. v. 1, 411 p.
- KANDALIAN. Megamaser galaxies. **Astrophysics**, v. 39, p. 237–244, 1996.
- KANDALYAN. Some Features of the X-Ray and Radio Emission from OH Megamaser Galaxies. **Astrophysics**, v. 48, p. 355–362, 2005.
- KARACHENTSEV; KARACHENTSEVA; HUCHTMEIER. Disturbed isolated galaxies: indicators of a dark galaxy population? **Astronomy and Astrophysics**, v. 451, p. 817–820, 2006.
- KAUFFMANN et al. The host galaxies of active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 346, p. 1055–1077, 2003.
- KAZES et al. Violent motions in starburst galaxies: the OH megamaser in IRAS 10039-3338. **Astronomy and Astrophysics**, v. 237, p. L1–L4, 1990.
- KENNICUTT; REYES. Revisiting the Integrated Star Formation Law. II. Starbursts and the Combined Global Schmidt Law. **The Astrophysical Journal**, v. 908, 2021.
- KEWLEY et al. Theoretical Modeling of Starburst Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 556, p. 121–140, 2001.
- KIM; VEILLEUX; SANDERS. The IRAS 1-Jy Survey of Ultraluminous Infrared Galaxies: II. Optical Spectroscopy. **The Astrophysical Journal**, v. 508, p. 627–647, 1998.

- LO. Mega-Masers and Galaxies. **Annual Review of Astronomy Astrophysics**, v. 43, p. 625–676, 2005.
- LONSDALE; FARRAH; SMITH. Ultraluminous infrared galaxies. In: MASON (Ed.). **Astrophysics Update 2**. Heidelberg: Springer Praxis Books, 2006. cap. 9, p. 285–336.
- LONSDALE et al. VLBI Imaging of Luminous Infrared Galaxies: Active Galactic Nucleus Cores in Markarian 231, UGC 5101, and NGC 7469. **The Astrophysical Journal**, v. 592, p. 804–818, 2003.
- LURIDIANA; MORISSET; SHAW. PyNeb: a new tool for analyzing emission lines. **Astronomy and Astrophysics**, v. 573, 2015.
- MARTINEZ-PAREDES et al. A deep look at the nuclear region of UGC 5101 through high angular resolution mid-IR data with GTC/CanariCam. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 454, p. 3577–3589, 2015.
- MASSEY et al. Spectrophotometric Standards. **Astrophysical Journal**, v. 328, p. 315–333, 1988.
- NARDINI et al. The role of nuclear activity as the power source of ultraluminous infrared galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 405, p. 2505–2520, 2010.
- ODA et al. Shedding Light on the Compton-thick Active Galactic Nucleus in the Ultraluminous Infrared Galaxy UGC 5101 with Broadband X-Ray Spectroscopy. **The Astrophysical Journal**, v. 835, 2017.
- OLIVEIRA, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia Astrofísica**. Porto Alegre: Livraria da Física, 2013. 780 p.
- OSTERBROCK, D. E.; FERLAND, G. J. **Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei**. United States of America: University Science Books, 2006. 408 p.
- PALMA. **Galaxy Interactions**. The Pennsylvania State University, 2020. Acesso em 24 jan. 2023. Disponível em: <https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/19_p6.html>.
- REID; MORAN. Masers. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 19, p. 231–276, 1981.
- RIFFEL. PROFIT: a new alternative for emission-line PROfile FITting. **Astrophysics Space Science**, 2010.
- RIFFEL et al. Chemical abundances in Seyfert galaxies - V. The discovery of shocked emission outside the AGN ionization axis. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 501, p. L54–L59, 2021.
- RUJOPAKARN et al. Morphology and Size Differences between Local & High Redshift Luminous Infrared Galaxies. **The Astrophysical Journal**, 2010.
- RUSCHEL-DUTRA, D. **danielrd6/ifscube v1.0**. Zenodo, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.3945237>>.
- SALES et al. An Embedded Active Nucleus in the OH Megamaser Galaxy IRAS16399-0937. **The Astrophysical Journal**, v. 799, p. 25, 2015.
- _____. Gemini IFU, VLA, and HST observation of the OH Megamaser Galaxy IRAS17526+3253. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 486, p. 3350–3367, 2019.
- SALPETER. Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects. **Astrophysical Journal**, v. 140, p. 796–800, 1964.
- SANDERS; MIRABEL. Luminous infrared galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 34, p. 749–792, 1996.

- SANDERS et al. Ultraluminous Infrared Galaxies and the Origin of Quasars. **The Astrophysical Journal**, v. 325, p. 74–91, 1988.
- SCHAWINSKI et al. Observational evidence for AGN feedback in early-type galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 382, p. 1415–1431, 2007.
- SCHNEIDER, P. **Extragalactic Astronomy and Cosmology: An introduction**. Alemanha: Springer Berlin, 2014. v. 2, 626 p.
- TSUCHIKAWA et al. A systematic study of silicate absorption features in heavily obscured AGNs observed by Spitzer/IRS. **Astronomy and Astrophysics**, v. 651, 2021.
- van der Marel; FRANX. A New Method for the Identification of Non-Gaussian Line Profiles in Elliptical Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 407, p. 525–539, 1993.
- van Dokkum. Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 113, p. 1420–1427, 2001.
- VEILLEUX et al. Optical Spectroscopy of Luminous Infrared Galaxies. II. Analysis of the Nuclear and Long-Slit Data. **Astrophysical Journal Supplement**, v. 98, p. 171–217, 1995.
- VEILLEUX; SANDERS; KIM. New Results from a Near-Infrared Search for Hidden Broad-Line Regions in Ultraluminous Infrared Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 522, p. 139–156, 1999.
- VIVIAN et al. Spectral energy distributions of local luminous and ultraluminous infrared galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 203, 2012.
- ZEL'DOVICH. The Fate of a Star and the Evolution of Gravitational Energy Upon Accretion. **Soviet Physics Doklady**, v. 9, p. 195, 1964.
- ZHANG et al. Extragalactic H₂O masers and X-ray absorbing column densities. **Astronomy and Astrophysics**, v. 450, p. 933–944, 2006.

NUP: 23081.058493/2023-14

Prioridade: Normal

Ato de entrega de dissertação/tese

134.334 - Dissertação e tese

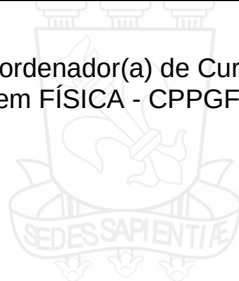
COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
1	Dissertação de mestrado (134.334)	dissertacao_ClaudiaMCassanta.pdf

Assinaturas

25/04/2023 10:45:08

RICARDO LUCIANO SONEGO FARIAS (Coordenador(a) de Curso (Substituto))
02.10.07.00.0.0 - CURSO-PROGRAMA PG em FÍSICA - CPPGF



1960



1960

Código Verificador: 2669869

Código CRC: b4f98021

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

