

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Mecanismos de Excitação, População Estelar e Propriedades Físicas
de LINERs no Óptico e Infravermelho Próximo

Luis Gabriel Dahmer Hahn

Itajubá, agosto de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Luis Gabriel Dahmer Hahn

Mecanismos de Excitação, População Estelar e Propriedades Físicas
de LINERs no Óptico e Infravermelho Próximo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Física como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Física

Área de concentração: Astrofísica

Orientador: Prof. Dr. Alberto Rodríguez Ardila

Agosto de 2015

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Luis Gabriel Dahmer Hahn

Mecanismos de Excitação, População Estelar e Propriedades Físicas
de LINERs no Óptico e Infravermelho Próximo

Dissertação aprovada por banca examinadora em 09 de
setembro de 2015, conferindo ao autor o título de
Mestre em Física

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alberto Rodríguez Ardila (Orientador)

Prof. Dr. Gabriel Rodrigues Hickel

Prof^a Dr^a Lucimara Pires Martins

Agosto de 2015

Itajubá

Dedico este trabalho à minha amada e querida esposa Paula Daniele Dahmer Hahn, por todas as batalhas que ela enfrentou ao meu lado nestes mais de 2 anos de casados, para fazer este trabalho se tornar possível. Se não fosse por você, este sonho jamais se tornaria realidade.

Te amo *ad infinitum*.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças e estar comigo ao meu lado em todas as horas.

Ao meu orientador e, mais que isso, amigo, professor Dr. Alberto Rodríguez Ardila, por todas as instruções e paciência em me orientar. Este trabalho é, em grande parte, mérito seu.

À minha amiga, namorada, esposa e companheira Dani, por ser muito mais que eu sempre sonhei encontrar em uma mulher.

À minha mãe e ao meu pai, pela força e suporte, por me darem a oportunidade de poder sempre contar com eles. Vocês são os melhores pais do mundo!

Aos meus avós, os quais eu tanto amo, e com os quais eu sempre pude contar em tudo.

Ao tio Rik, tia Tânia e Miriã, pela amizade e companheirismo, tendo se tornado minha família itajubense.

Ao meu ex-professor de matemática do ensino médio, Rogério, por ter me incentivado a me tornar um físico, ter sido um excelente professor e, até hoje, um dos maiores exemplos para mim.

Ao LNA pelo amplo suporte que me foi dado em apoio e recursos

“O cientista não estuda a natureza porque ela é útil; ele a estuda porque se deleita nela, e se deleita nela porque ela é bela. Se a natureza não fosse bela, não valeria a pena ser conhecida, e se não valesse a pena ser conhecida, a vida não valeria a pena ser vivida.” Henry Poincaré

RESUMO

LINER é uma classe de AGNs cujo espectro óptico e infravermelho é dominado por linhas de emissão de baixa ionização e um contínuo dominado por população estelar. O debate central está na determinação da natureza da fonte central de energia, muitas vezes associada a um núcleo ativo. Em outros casos, no entanto, a ionização pode ocorrer por outros mecanismos, como choques, estrelas pAGB ou *starbursts*. Através de dados infravermelhos de duas amostras distintas de LINERs, uma composta por oito objetos pertencentes preferencialmente à classe de ETGs, com espectros unidimensionais, e outra composta por três objetos pertencentes à classe de LIRGs, com dados de espectrógrafos de campo integral, além de dados ópticos para algumas das galáxias das duas amostras, estudamos a fonte de ionização das linhas em LINERs. Para tal, utilizamos um código de síntese de população estelar (*starlight*) e ferramentas de análise das linhas de emissão subjacentes. A localização das galáxias ETGs em diagramas BPT indicam razões de linhas típicas de LINERs, enquanto que galáxias LIRGs localizam-se na região de objetos em transição, sugerindo que mecanismos de ionização distintos possam coexistir nestas galáxias. Para as galáxias ETGs, foram encontradas altas contribuições de populações estelares com idades intermediárias, às quais seriam capazes de ionizar o gás em emissão, embora mecanismos adicionais não possam ser descartados nestes objetos. Nas galáxias LIRGs, encontramos regiões LINERs compatíveis com AGNs no núcleo das galáxias UGC 02982 e UGC 12914, com a emissão LINER da UGC 00556 se estendendo para todo o campo de visão do IFU, o que sugere uma ionização por estrelas pAGB e *starbursts*. Estes resultados sugerem mecanismos diferentes de ionização para objetos que são classificados ópticamente como LINERs, com galáxias ETGs sendo ionizadas preferencialmente por estrelas pAGB e a ionização em galáxias LIRGs ocorrendo principalmente por *starbursts* e AGNs.

ABSTRACT

LINER is a class of AGN whose optical and infrared spectrum is dominated by low ionization emission lines and a continuous dominated by stellar population. The central debate is to determine the nature of the central energy source, often associated with an active nucleus. In other cases, however, the ionization may occur by other mechanisms, such as shocks, pAGB stars or starbursts. Through infrared data from two different samples of LINERs, one composed of eight objects belonging to the ETG class with one-dimensional spectra, and another comprising three objects belonging to the LIRG class with integral field unit data, in addition to optical data for some galaxies of the two samples, we studied the ionization source for the LINERs lines. For this purpose, we used a stellar population synthesis code (starlight) and analysis tools of the underlying emission lines. The location of ETG galaxies over BPT diagrams indicate typical line ratios of liners, while LIRGs are located in the region of transition objects, suggesting that different ionization mechanisms can coexist in these galaxies. For ETGs, we found high contributions coming from intermediate age stellar population, which would be able to ionize the emitting gas, but additional mechanisms can not be ruled out for these objects. For the LIRGs, we found LINERs compatible with AGNs in the core of UGC 02982 and UGC 12914, with UGC 00556 LINER emission extending over the entire field of view of the IFU, which suggests ionization by pAGB stars and starbursts. These results suggest different ionization mechanisms for objects that are optically classified as LINERs, with ETGs being ionized preferably by pAGB stars and LIRGs ionization occurring mainly by AGNs and starbursts.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS	16
INTRODUÇÃO	17
1.1 O modelo unificado	18
1.2 LINERs	19
1.3 LIRGs	22
1.4 Objetivos do trabalho	25
AMOSTRA, OBSERVAÇÕES E REDUÇÃO DE DADOS	27
2.1 Amostra APO	27
2.2 Amostra NIFS	31
2.3 Redução e calibração	37
2.4 O instrumento NIFS	38
2.5 Limitações dos scripts NIFS	41
2.5.1 Escalonamento	43
2.6 Descrição individual da amostra	45
METODOLOGIA	50
3.1 Análise das linhas de emissão	50
3.1.1 Razões de linha	53
3.1.2 Taxa de formação estelar através das linhas de Hidrogênio	54
3.2 Análise do contínuo	56
3.2.1 Síntese de população estelar no óptico	58
3.2.2 Síntese de população estelar no infravermelho	59
3.2.3 A base	59
3.2.4 O código	60

3.2.5 Apresentação dos resultados	63
3.3 Cinemática estelar	64
3.3.1 Modelos de rotação	66
RESULTADOS E DISCUSSÃO – AMOSTRA APO	67
4.1 Dados ópticos	67
4.2 Dados infravermelhos	71
RESULTADOS E DISCUSSÃO – AMOSTRA NIFS	79
5.1 Síntese óptica e diagramas de diagnóstico	79
5.2 UGC 00556	84
5.2.1 População estelar	89
5.3 UGC 02982	93
5.3.1 População estelar	98
5.4 UGC 12914	103
5.4.1 Síntese de população estelar	107
5.5 Discussões gerais	111
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	113
BIBLIOGRAFIA	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades básicas da amostra APO. Valores e dados encontrados na literatura...	30
Tabela 2.2 – Propriedades básicas da amostra NIFS. Valores retirados de Sanders et al. (2003)..	33
Tabela 4.1a – Percentagem de população jovem, intermediária e velha e valores de avermelhamento para espectros ópticos da amostra APO.....	72
Tabela 4.1b – Valores de idade média, metalicidade, SFR, fator de normalização e qualidade do ajuste para espectros ópticos da amostra APO.....	72
Tabela 4.2 – Valores de idade média deduzida a partir da luminosidade retirados de Delgado et al. (2014).....	72
Tabela 4.3 – Taxa de formação estelar em M_{\odot} /ano deduzida a partir das linhas de $H\alpha$	73
Tabela 4.4a – Percentagem de população jovem, intermediária e velha e valores de avermelhamento para espectros infravermelhos da amostra APO.....	77
Tabela 4.4b – Valores de idade média, metalicidade, SFR, fator de normalização e qualidade do ajuste para espectros infravermelhos da amostra APO.....	77
Tabela 4.5a – Percentagem de população jovem, intermediária e velha para valores fixos de avermelhamento para espectros infravermelhos da amostra APO.....	80
Tabela 4.5b – Valores de idade média, metalicidade, SFR, fator de normalização e qualidade do ajuste para espectros ópticos da amostra APO.....	80
Tabela 5.1a – Percentagem de população jovem, intermediária e velha e valores de avermelhamento para espectros ópticos da amostra NIFS.....	82
Tabela 5.1b – Valores de idade média, metalicidade, SFR, fator de normalização e qualidade do ajuste para espectros ópticos para a amostra NIFS.....	82
Tabela 5.2 – Taxa de formação estelar em M_{\odot} /ano deduzida a partir das linhas de $H\alpha$ e valores de fluxo das linhas de $H\beta$, $[NII]\lambda 6583 \text{ \AA}$ e $[OIII]\lambda 5007 \text{ \AA}$	84
Tabela 5.3 – Valores de fluxo, velocidade média e FWHM obtidos para as linhas presentes em uma região de 0.35 segundos de diâmetro centrada no núcleo da galáxia UGC 12914.....	109
Tabela 5.4 – Taxa de formação estelar deduzida a partir da síntese de população estelar e a partir do fluxo da linha de Bry	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Modelo unificado para os AGNs (Figura extraída de Zier & Biermann 2002 e editada).....	21
Figura 1.2 – SED típica de algumas ULIRGS (retirado de Sanders and Mirabel 1996).....	25
Figura 2.1 – À esquerda, imagem 2MASS e posição da fenda e à direita, espectro infravermelho para as galáxias NGC 4636, NGC 5905, NGC 5966 e NGC 6081. As faixas verticais em cinza correspondem às regiões onde a transmissão pela atmosfera terrestre é baixa, e, portanto, o espectro nestas regiões não é mostrado. As barras de erros para cada ponto espectral são mostradas em cinza. Em todas as Figuras, o norte está para cima e o leste para a esquerda.....	31
Figura 2.2 – Igual à Figura 2.1 para a NGC 6146, NGC 6338, UGC 08234 e UGC 10695.....	32
Figura 2.3 – No painel superior esquerdo, imagem da UGC 00556 obtida com o telescópio 2MASS, com a escala angular indicada. No painel superior direito, zoom do campo de visão NIFS, com fluxo integrado das bandas J, H e K em $\text{ergs cm}^{-1} \text{s}^{-2} \text{Å}^{-1}$, onde está indicada a escala de distância. No painel inferior, espectro integrado da região circular de 0.35 segundos de diâmetro indicada na imagem NIFS em cinza, com as principais linhas de emissão e bandas de absorção indicadas.....	35
Figura 2.4 – Igual à Figura 2.3 para a UGC 02982.....	36
Figura 2.5 – Igual à Figura 2.3 para a UGC 12914.....	37
Figura 2.6 – Painel superior - posição das fendas para os dados ópticos. À esquerda, UGC 00556 e à direita UGC 02982. Painel inferior – espectros ópticos referentes.....	38
Figura 2.7 – Ilustração do princípio AIS. Retirado de Schönell Júnior (2013).....	40
Figura 2.8 – Modelo de um cubo de dados.....	41
Figura 2.9 – Exemplos de arquivos fits obtidos com o NIFS.....	42
Figura 2.10 – Gráfico da função de sensibilidade do NIFS, em magnitudes, em função do comprimento de onda.....	44
Figura 2.11 – Em vermelho o espectro obtido com GNIRS e em preto o espectro integrado correspondente à fenda do GNIRS obtido com o NIFS para a galáxia UGC 02982. À esquerda, espectro antes do escalonamento e à direita o espectro após escalonado. Os valores de escala foram 1.20 para J, 1.30 para H e 1.47 para K.....	46

Figura 2.12 – Acima, espectros observado e sintetizado para os valores não escalonados da UGC 00556. Abaixo, espectros observado e sintetizado após o escalonamento.....	47
Figura 3.1 – Exemplos de ajustes de gaussianas para seis pontos da galáxia UGC 02982 para a linha de Bry feitos pelo programa fitcube. Os dados são mostrados em preto e os ajustes em vermelho. O comprimento de onda está em Angstroms e o fluxo em ergs/s/cm ² /Å.....	54
Figura 3.2 – Exemplos de ajustes divergentes da linha de H ₂ λ 22230 Å para a UGC 12914.....	54
Figura 3.3 – Diagramas de diagnóstico no infravermelho (painel esquerdo) e no óptico (painel direito).....	56
Figura 3.4 – Espectro de cinco estrelas retiradas de Maraston (2005), com metalicidade de Z = 0.01 Z _⊙ e idades de 1, 3, 3.5, 4 e 5 milhões de anos.....	59
Figura 3.5 – Espectro observado, espectro modelado pelo starlight e resíduo para o núcleo da galáxia UGC 12914. O espectro observado é normalizado em 22000 Å.....	63
Figura 3.6 – Componentes do espectro sintetizado da Figura, com um A _v de 2.47. Para cada componente, são mostrados a porcentagem em fluxo, a idade e a metalicidade.....	64
Figura 3.7 – Saída do programa ppxf para dois espectros normalizados. Em preto, dados observados da galáxia UGC 12914. Em vermelho, ajuste feito pelo programa e em verde, resíduo da subtração do espectro observado pelo espectro modelado. À esquerda, espectro ruidoso próximo à borda do cubo. À direita, espectro com alto S/N localizado no centro luminoso do cubo.....	67
Figura 3.8– No painel esquerdo, curva de rotação observada para a linha de Bry da galáxia UGC 02982, através da qual foi ajustado o modelo ideal de rotação, mostrado no centro, com a linha dos nodos em cinza. À direita, resíduo da subtração.....	69
Figura 4.1 – Espectro observado, modelado, ruído e máscara da síntese para a NGC 4636.....	70
Figura 4.2 – Igual à Figura 4.1 para a NGC 5966 (painel superior), NGC 6081 (painel central) e NGC 6338 (painel inferior).....	71
Figura 4.3 – Diagrama BPT retirado de Bamford et al. (2008) com as 4 galáxias sobrepostas (quadrados cheios em preto). O número do catálogo NGC encontra-se ao lado de cada ponto. De acordo com a localização dos pontos no diagrama, confirmamos a classificação de núcleo LINER.....	73
Figura 4.4 – Espectro observado (preto), modelado pelo starlight (vermelho) e resíduo (azul) para a NGC 4636 (painel superior esquerdo), NGC 5905 (superior direito), NGC 5966 (inferior	

esquerdo) e NGC 6081(inferior direito). O símbolo \oplus indica um resíduo deixado após a remoção das bandas telúricas. As informações do resultado da síntese são apresentadas na Tabela 4.3.....	75
Figura 4.5 – Igual à Figura 4.4 para a NGC 6146 (painel superior esquerdo), NGC 6338 (superior direito), UGC 08234 (inferior esquerdo) e UGC 10695 (inferior direito).....	76
Figura 4.6 – Ajustes do starlight com A_v fixo para as galáxias APO com dados SDSS.....	79
Figura 5.1 – Acima, espectro óptico observado e sintetizado, para a UGC 00556. Abaixo, o mesmo para a UGC 02982.....	83
Figura 5.2 - Diagrama BPT retirado de Bamford et al. (2008). As galáxias APO aparecem em azul e as duas galáxias NIFS com dados ópticos estão em preto, com o número do catálogo NGC ao lado de cada ponto.....	84
Figura 5.3 – No painel superior esquerdo, regiões integradas sobrepostas ao diagrama de diagnóstico retirado de Colina et al. (2015). Nos demais painéis, posição dos pontos individuais.....	86
Figura 5.4 – Mapas de distribuição de fluxo para as linhas de [FeII] λ 16440 Å, HeI λ 20588 Å, H ₂ λ 21212 Å e Br γ λ 21660 Å da galáxia UGC 00556 retornados pelo fitcube. Sobre o mapa da linha de H ₂ , apresentamos o contorno do contínuo integrado das bandas JHK.....	88
Figura 5.5 – Mapas das razões das linhas de H ₂ /Br γ e [FeII]/Br γ , valor de A_v deduzido a partir da razão das linhas de Pa β /Br γ em magnitudes e a taxa de formação estelar deduzida a partir da linha de Br γ corrigida por A_v em unidades de M_{\odot} /ano/píxel para a galáxia UGC 00556.....	89
Figura 5.6 – Mapas de FWHM para as linhas de [FeII] λ 16440 Å e Br γ λ 21660 Å da galáxia UGC 00556 retornados pelo fitcube.....	91
Figura 5.7– No painel superior, à esquerda, curva de rotação observada para a linha de Br γ da galáxia UGC 00556, através da qual foi ajustado o modelo ideal de rotação, mostrado no centro, com a linha dos nodos em cinza. À direita, resíduo da subtração. No painel inferior, curva de rotação para a linha de [FeII] λ 16440 Å com o resíduo da subtração pelo modelo de Br γ mostrado ao lado.....	91
Figura 5.8 – Contribuição em porcentagem em massa e em luminosidade para as diferentes populações estelares da a galáxia UGC 00556 obtidas a partir do programa starlight.....	93
Figura 5.9 – Fatores de normalização e valores do logaritmo da idade média deduzidos a partir da massa e luminosidade para a galáxia UGC 00556.....	94
Figura 5.10 – Valores de metalicidade (Z) deduzidos a partir da massa e luminosidade, χ^2 , A_{dev} , SFR em unidades de M_{\odot} /ano/píxel e A_v em magnitudes encontrados pelo starlight para a galáxia UGC 00556.....	95

- Figura 5.11 – Mapas de distribuição de fluxo para as linhas de [FeII] $\lambda 16440 \text{ \AA}$, $H_2 \lambda 21212 \text{ \AA}$ e $B\gamma \lambda 21660 \text{ \AA}$ da galáxia UGC 02982 retornados pelo fitcube. Sobre o mapa da linha de H_2 , mostramos os contornos do contínuo integrado das bandas JHK.....97
- Figura 5.12 – Mapas das razões das linhas de $H_2 / B\gamma$ e $[FeII]/B\gamma$, valor de A_v deduzido a partir das razões de linhas de $Pa\beta/B\gamma$ em magnitudes e a taxa de formação estelar deduzida a partir da linha de $B\gamma$ corrigida por A_v e em unidades de $M_{\odot} / \text{ano}/\text{píxel}$ para a galáxia UGC 02982....98
- Figura 5.13 – Mapas de FWHM para as linhas de [FeII] $\lambda 16440 \text{ \AA}$ e $B\gamma$ da galáxia UGC 02982 calculados pelo fitcube.....100
- Figura 5.14– No painel esquerdo, curva de rotação observada para a linha de $B\gamma$ da galáxia UGC 02982, através da qual foi ajustado o modelo ideal de rotação, mostrado no centro, com a linha dos nodos em cinza. À direita, resíduo da subtração.....100
- Figura 5.15 – Rotação estelar da galáxia UGC 02982, deduzida a partir das bandas de CO na banda K. O resíduo da subtração da rotação estelar pelo modelo da rotação do gás mostraram amplitudes diferentes, de modo que um novo modelo foi deduzido a partir da rotação estelar. O resíduo é mostrado para os dois casos.....101
- Figura 5.16 – Contribuição em porcentagem em massa e em luminosidade para as diferentes populações estelares da galáxia UGC 02982 obtidas a partir do programa starlight.....103
- Figura 5.17 – Fatores de normalização e valores do logaritmo da idade média deduzidos a partir da massa e luminosidade para a galáxia UGC 02982.....104
- Figura 5.18 – Valores de metalicidade (Z) deduzidos a partir da massa e luminosidade, χ^2 , A_{dev} , SFR em unidades de $M_{\odot}/\text{ano}/\text{píxel}$ e A_v em magnitudes encontrados pelo starlight para a galáxia UGC 02982.....105
- Figura 5.19 – Mapas de distribuição de fluxo das linhas de [FeII] $\lambda 16440 \text{ \AA}$, HeI $\lambda 20588 \text{ \AA}$, $H_2 \lambda 21212 \text{ \AA}$ e $B\gamma \lambda 21660 \text{ \AA}$ da galáxia UGC 12914. Sobre os mapas das linhas de H_2 e $B\gamma$, apresentamos o contorno do contínuo integrado das bandas JHK.....107
- Figura 5.20 – Mapas das razões das linhas de $H_2 / B\gamma$ e $[FeII]/B\gamma$, valor de A_v deduzido a partir das razões de linhas de $Pa\beta/B\gamma$ em magnitudes e a taxa de formação estelar em $M_{\odot} / \text{ano}/\text{píxel}$ deduzida a partir da linha de $B\gamma$ corrigida por A_v para a galáxia UGC 12914.....108
- Figura 5.21 – No painel superior, rotação estelar observada, modelada e resíduo da subtração para a UGC 12914. A linha dos nodos para o modelo é mostrada em cinza. No painel inferior, rotação observada para a linha de H_2 e resíduo da subtração da rotação observada pela rotação estelar modelada.....109

Figura 5.22 – Contribuição em porcentagem em massa e em luminosidade para as diferentes populações estelares da galáxia UGC 12914 obtidas a partir do programa starlight.....111

Figura 5.23 – Fatores de normalização e valores do logaritmo da idade média deduzidos a partir da massa e luminosidade para a galáxia UGC 12914.....112

Figura 5.24 – Valores de metalicidade (Z) deduzidos a partir da massa e luminosidade, χ^2 , A_{dev} , SFR em unidades de M_{\odot} /ano/píxel e A_v em magnitudes encontrados pelo starlight para a galáxia UGC 12914.....113

LISTA DE ABREVIATURAS

2MASS – Two Micron All-Sky Survey
AGB – Asymptotic Giant Branch
AGN – Active Galactic Nucleus
AIS – Advanced Image Slicer
APO – Apache Point Observatoty
ARC – Astrophysical Research Consortium
BLR – Broad Line Region
BLRG – Broad Line Radio Galaxy
BPT – Baldwin, Phillips & Terlevich
CALIFA – Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey
CCD – Charge-Coupled Device
ETG – Early-Type Galaxies
FWHM – Full Width at Half Maximum
GNIRS – Gemini Near Infrared Spectrograph
IFU – Integral Field Unit
HLIRG – Hyper Luminous Infrared Galaxy
IDL – Interactive Data Language
IRAF – Image Reduction And Analysis Facility
IRAS – Infrared Astronomical Satellite
IRG – Infrared Galaxy
LINER – Low Ionization Emission Line Region
LIRG – Luminous Infrared Galaxy
LLAGN – Low Luminosity AGN
LNA – Laboratório Nacional de Astrofísica
LOSVD – Line-of-Sight Velocity Distribution.
NED – Nasa Extragalactic Database

NGC – New General Catalogue
NIFS – Near-Infrared Integral-Field Spectrograph
NIR – Near Infrared
NLR – Narrow Line Region
NLRG – Narrow Line Radio Galaxy
OSIRIS – Ohio State Infrared Imager/Spectrometer
OVV – Optically Violently Variable Quasars
pAGB – post-Asymptotic Giant Branch
PV – Posição – Velocidade
SDSS – Sloan Digital Sky Survey
SED – Spectral Energy Distribution
SFG – Star Forming Galaxy
SFR – Star Formation Rate
SOAR – Southern Astrophysical Research Telescope
SSP – Simple Stellar Population
S/N – Signal to Noise ratio
TDE – Tidal Disruption Event
TIRGO - Telescopio InfraRosso del Gornergrat
UGC – Uppsala General Catalogue
ULIRG – Ultra Luminous Infrared Galaxy
WR – Wolf–Rayet Star

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Muitas das galáxias presentes no universo possuem buracos negros em seu núcleo, e há evidências observacionais de que esta possa ser uma regra sem exceções (Ferrarese & Merritt, 2000, Gebhardt et al., 2000). Em galáxias “normais”, o buraco negro não está sendo alimentado, e é orbitado apenas por estrelas, gás e poeira, de modo que este sistema emite pouca ou nenhuma radiação. Em outros casos, no entanto, a situação é mais dramática. O buraco negro está sendo acrescido por matéria distribuída em forma de um disco, e, neste caso, temos um núcleo ativo de galáxia (AGN – Active Galactic Nuclei), no qual sua luminosidade pode passar de 10^{47} ergs/s.

A classe mais extrema de objetos com um núcleo ativo é a de quasares, os quais foram primeiro observados em comprimentos de onda em rádio no final da década de 50 (Shields 1999). São objetos com aparência de tipo estelar, cujo espectro é dominado por linhas de emissão extremamente largas e intensas, com larguras típicas entre 2000 e 5000 km/s, podendo passar de 10^4 km/s. A grande maioria destas fontes encontra-se a distâncias cosmológicas, alguns deles com $z > 8$, além de poderem ter ou não uma emissão em rádio muito intensa (*radio-loud* ou *radio-quiet*). Outra classe de galáxias com AGNs é a classe de galáxias Seyfert, que já eram conhecidas desde o início do século XX, mas que recebem este nome por terem sido primeiramente descritas por Carl Seyfert (1943). Estas galáxias são caracterizadas por núcleos cuja luminosidade chega a ser igual a da galáxia hospedeira, podendo ser até 100 vezes mais intensos nos casos mais extremos. Do ponto de vista espectroscópico, as galáxias Seyfert foram classificadas em dois tipos por Khachikian & Weedman (1974). As galáxias Seyfert de tipo 1 possuem linhas de emissão permitidas, cujas larguras podem em alguns casos chegar a 10^4 km/s e linhas estreitas permitidas e proibidas com larguras típicas da ordem de 500 km/s, enquanto que galáxias Seyfert de tipo 2 possuem apenas linhas estreitas permitidas e proibidas. Outros tipos de núcleos ativos são os blazares, que são objetos com espectros quase desprovidos de linhas em emissão,

dominados por um contínuo cuja luminosidade pode variar até 50% em um único dia. Os blazares se subdividem em quasares ópticos violentamente variáveis (OVV) e objetos BL Lac.

Uma outra classe de núcleos ativos são os LINERs (Low-Ionization Nuclear Emission Region), identificados primeiramente por Heckmann (1980), e cuja fonte de ionização ainda está em discussão. Estima-se que 50% de todas as galáxias possuam um núcleo LINER (Ho 2008).

1.1 O modelo unificado

Os núcleos ativos citados acima, que a princípio eram tratados de forma independente uns dos outros, foram unificados por Urry & Padovani (1995). Eles interpretaram as diferentes classes de AGNs como possuindo todas o mesmo mecanismo de produção de energia, sendo diferenciados através da orientação relativa entre o observador e a fonte central.

Segundo o modelo unificado, apresentado na Figura 1.1, um AGN é composto por um buraco negro com massa entre 10^5 e $10^9 M_{\odot}$ envolto por um disco de acreção geométricamente fino e ópticamente espesso em rotação, que alimenta o buraco negro central. As linhas largas se originariam em nuvens de gás de alta densidade ($n_H > 10^9 \text{ cm}^{-3}$) próximas à fonte central, região que recebe o nome de *Broad Line Region* (BLR). As linhas estreitas são formadas nas nuvens de gás mais distantes da fonte central, de menor densidade ($n_H < 10^7 \text{ cm}^{-3}$), em uma região chamada de *Narrow Line Region* (NLR).

Como a temperatura da BLR é muito alta, não pode existir poeira nesta região, já que a temperatura de sublimação dos grãos que a compõem é de aproximadamente 1400 K (Barvainis 1987; Rodríguez-Ardila & Mazzalay 2006). Em distâncias maiores do núcleo, no ponto onde a temperatura não é capaz de sublimar a poeira, estaria o elemento principal do modelo unificado, o toróide de gás e poeira, que circunda a fonte central (buraco negro + disco de acreção).

Dependendo da orientação relativa entre o observador e o núcleo ativo, o toróide impede a observação direta da fonte central e a BLR, sendo visível apenas a NLR, de modo que a galáxia recebe a classificação de Seyfert 2. Nos casos onde a orientação relativa permite a observação direta da fonte central e da BLR, a galáxia recebe a classificação de quasar ou Seyfert 1.

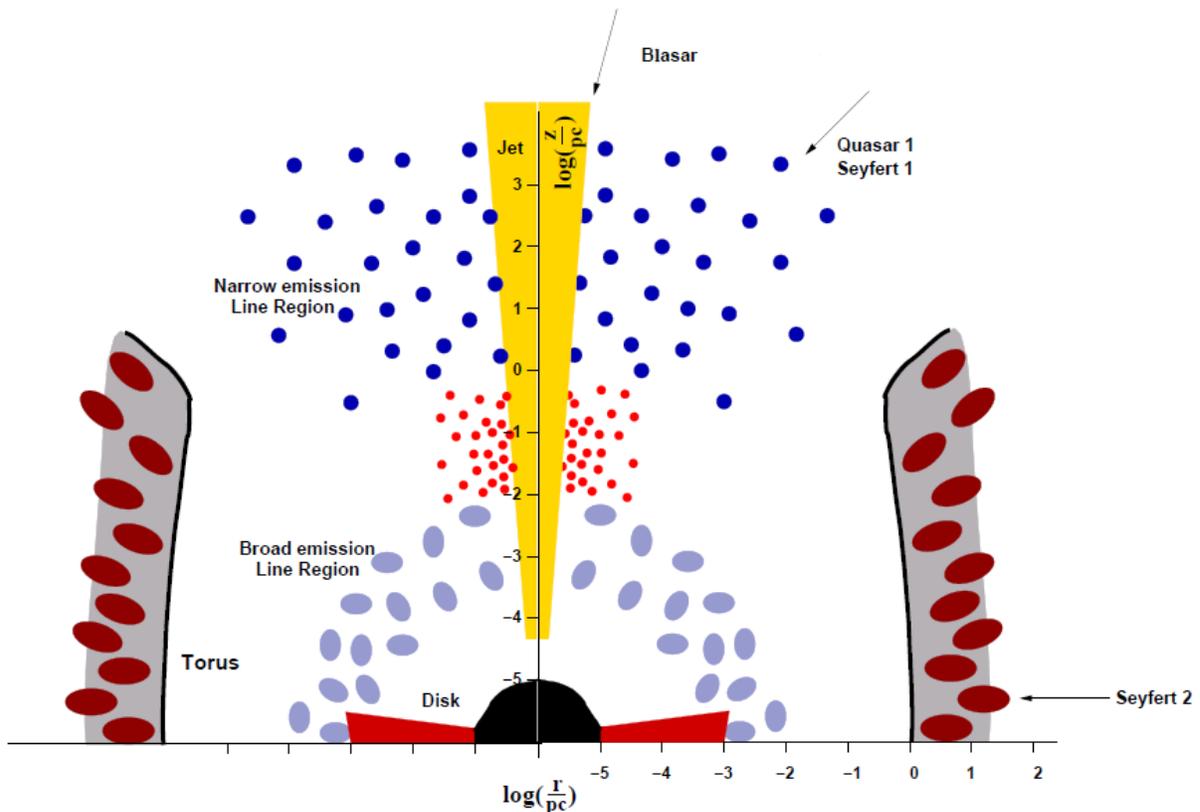


Figura 1.1 – Modelo unificado para os AGNs (Figura extraída de Zier & Biermann 2002 e editada).

1.2 LINERs

Estima-se que cerca de 1/3 de todas as galáxias do universo local possuam um núcleo ativo de baixa luminosidade (LLAGNs – Low Luminosity AGNs; Ho 2008), e que este número suba para aproximadamente 2/3 em galáxias elípticas e lenticulares (ETGs – Early Type Galaxies). Dentre estas galáxias, a classe mais comum é a dos LINERs (Low-Ionization Nuclear Emission-Line Region - regiões de emissão de linhas nucleares de baixa ionização; Ho 2008).

A classe de LINERs foi inicialmente sugerida por Heckman (1980), e sua principal característica são fortes linhas espectrais de baixa ionização como [OI] e [NI] se comparadas às linhas de alta excitação, como [OIII] (com potencial de ionização de 35.1 eV, Lide 2004). As

linhas de alta ionização nestes objetos são extremamente fracas se comparado às demais classes de AGNs, de modo que a definição dada por Heckman como limiar para um LINER foram as razões das linhas $[O II] \lambda 3727\text{\AA}/[O III] \lambda 5007\text{\AA} > 1$ e $[OI] \lambda 6300 \text{\AA}/[O III] \lambda 5007 \text{\AA} > 1/3$.

Os levantamentos de O'Connell & Dressel (1978) e Heckman (1980) confirmaram a hipótese de correlação entre brilhantes emissões causadas por mecanismos LINER e fontes nucleares compactas de rádio. Segundo O'Connell & Dressel (1978), na maioria destes objetos, praticamente toda a emissão de rádio provém de fontes sincrotron compactas. Também são encontradas emissões LINER em algumas rádio-galáxias energéticas com espectro íngreme (Ford et al., 1994; Harms et al., 1994).

Observações de LINERs no ultravioleta sugerem que esta classe é extremamente inhomogênea, com algumas fontes possuindo fortes linhas em emissão e outras com um espectro UV causado apenas por estrelas velhas (Maoz et al., 1998), podendo apresentar as duas características simultaneamente.

Alguns LINERs também possuem emissões significativas em raios-X, apresentando fontes compactas e espectralmente duras, implicando uma intensa atividade nuclear (Serlemitsos et al., 1996).

Da mesma forma que nas galáxias *Seyferts*, alguns LINERs também apresentam componentes largas (e.g. Barth et al., 1999; Phillips, 1979; Filippenko & Halpern, 1984), especialmente na linha de H_{α} , de modo que eles também podem ser divididos em LINERs tipo 1 e tipo 2, seguindo o modelo unificado e supondo uma relação entre a angulação e o tipo de atividade nuclear. Medidas cinemáticas sugerem que estas linhas são causadas por acreção de matéria por um buraco negro super massivo. No entanto, mesmo as linhas estreitas observadas em LINERs possuem larguras da ordem de centenas de quilômetros por segundo, mesmo quando observadas a partir do telescópio Hubble, implicando a presença de turbulência, fluxos não-rotacionais ou choques em altas velocidades (Ford et al., 1994; Harms et al., 1994).

Como os LINERs se relacionam com o modelo unificado e como são geradas suas características espectrais ainda é questão em debate. Vários modelos têm sido usados para explicar as propriedades observadas (e.g. Ho et al. 1993; Filippenko, 2003; Dopita & Sutherland 1995), sendo as mais aceitas:

i) Gás aquecido por choques, como em algumas galáxias com emissão em rádio (Heckman 1980).

ii) Fotoionização por um disco de acreção ao redor de um buraco negro, como em galáxias *Seyfert* (Ferland & Netzer, 1983; Halpern & Steiner, 1983).

iii) Intensa formação estelar recente (*starburst*), com idade entre 3 e 5 milhões de anos e contínuo ultravioleta dominado por estrelas *Wolf-Rayet* (WR) (Barth & Shields, 2000).

iv) Fotoionização por populações de estrelas pós-AGB (pAGB) para algumas galáxias elípticas (Binette et al., 1994).

A hipótese do disco de acreção foi confirmada em algumas galáxias. Barth et al. (1999) encontraram uma BLR no LINER da NGC 1052. Ho et al. (1997) mostraram que, para uma amostra de LLAGNs, aproximadamente 20% são do tipo 1, e que destes, mais da metade pertence à classe dos LINERs. Ao mesmo tempo, eles também encontraram que nem todos os LINERs possuem uma BLR, de modo que, para estes objetos, a ausência de linhas largas não está relacionada à angulação, de modo que sua energização ocorre por outros dos modelos citados. Há ainda fontes que são energizadas por mais de um mecanismo (Winkler 2014).

O termo LINER originalmente estava restrito a região nuclear de uma galáxia. No entanto, em diversas fontes são encontradas emissões em escalas de quiloparsecs que mantêm espectros típicos de LINERs, o que implica que regiões estendidas são excitadas por mecanismos adicionais. Estas regiões, que recebem o nome de LINERs estendidos, foram estudadas por Yan & Blanton (2012), que encontraram que a hipótese de ionização por uma fonte central não é compatível com a extensão da região ionizada, de modo que mecanismos adicionais são necessários, como estrelas pAGB. Este mesmo resultado foi encontrado para dados espectroscópicos do survey CALIFA (Singh et al. 2013).

Com as observações usando IFUs (Integral Field Unit), se tornou possível isolar os componentes das galáxias, e procurar por eventuais fontes centrais, escoamentos ou populações estelares capazes de ionizar o gás. Loubser & Soechting (2013) encontraram, para uma amostra de 4 galáxias CCGs (Central Cluster Galaxies) com emissão LINER, que modelos AGN explicam melhor os dados obtidos, embora modelos com choques e fotoionização por estrelas pAGB não possam ser descartados. Já Ricci, Steiner & Menezes (2014a, b; 2015) encontraram, para uma

amostra de 10 LINERs, que na maioria dos objetos, existe a presença de uma fonte central, provavelmente energizada por um AGN. Ainda, três das galáxias possuem uma estrutura circumnuclear em forma de disco, compatível com fotoionização por estrelas pAGB e uma das galáxias estudadas apresenta fotoionização compatível com choques.

1.3 LIRGs

As primeiras observações de galáxias no infravermelho foram realizadas nos últimos anos da década de 1960 (Low & Kleinmann, 1968; Kleinmann & Low, 1970), e uma população de galáxias com emissão dominante no infravermelho nas regiões nucleares foi primeiro discutida por Rieke & Low (1972). Mas foi o telescópio IRAS (InfraRed Astronomy Satellite) que realizou as primeiras observações e descobertas de Galáxias Luminosas no Infravermelho (Luminous InfraRed Galaxies – LIRGs), Galáxias Ultra Luminosas no Infravermelho (Ultra Luminous InfraRed Galaxies – ULIRGs) e Galáxias Hiper Luminosas no Infravermelho (Hyper Luminous InfraRed Galaxies – HLIRGs), definidas como galáxias com luminosidade infravermelha entre 8 e 1000 μm ($L_{8-1000\mu\text{m}}$) maior que 10^{11} Luminosidades Solares (L_{\odot}) para as LIRGs, maior que 10^{12} L_{\odot} para as ULIRGs e maior que 10^{13} L_{\odot} para as HLIRGs. Todas estas galáxias são tratadas em conjunto como galáxias infravermelhas (InfraRed Galaxies – IRGs). O satélite IRAS foi lançado em 1983 e observou todo o céu em quatro bandas no infravermelho próximo e distante (12, 25, 60, e 100 μm), cuja missão durou 10 meses. A Figura 1.2 mostra uma distribuição de energia espectral (Spectral Energy Distribution – SED) típica de algumas galáxias ULIRGs.

Estas galáxias não ganharam muita importância inicialmente, pois logo se percebeu que elas são comparativamente raras localmente, com densidade espacial várias ordens de magnitude mais baixas que a de galáxias normais, embora mais abundantes que quasares.

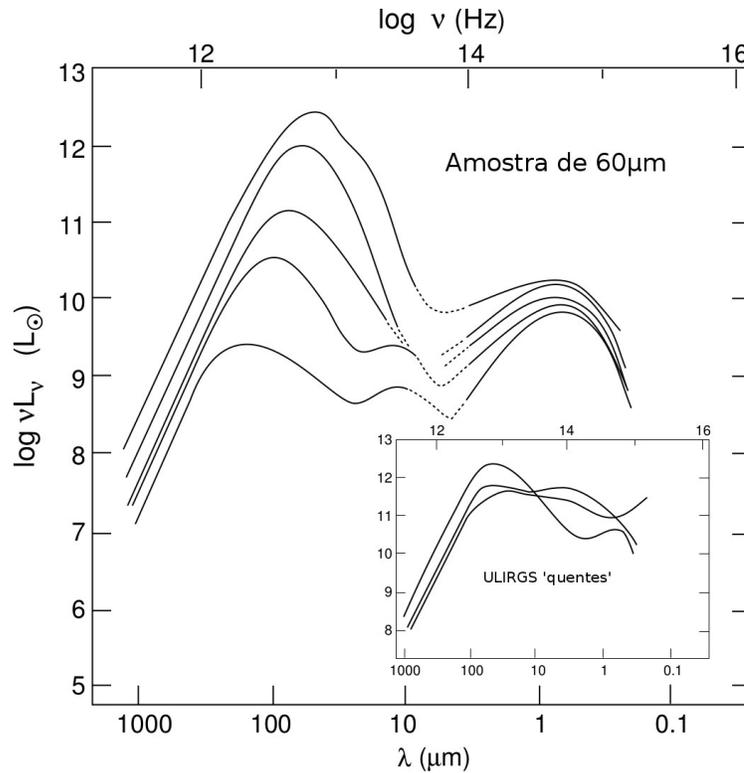


Figura 1.2 – SEDs típica de algumas ULIRGS (retirado de Sanders & Mirabel 1996). Cada linha representa uma galáxia.

Contudo, estudos posteriores utilizando dados IRAS mostraram que as LIRGs dominavam a formação estelar no universo local ($z < 1$). As ULIRGs, por sua vez, eram ordens de magnitude mais numerosas em $z > 1$ que localmente, sendo muito mais numerosas que quasares ópticamente brilhantes por uma grande margem. Estudando estas galáxias em mais detalhes, foi possível traçar a evolução da população de LIRGs e ULIRGs com redshift até $z \approx 0.5$, que possui uma forma aproximada de $(1+z)^4$ (Lonsdale et al. 2006).

A morfologia destas galáxias foi primeiro estudada em dois artigos. Soifer et al (1984) e Rieke & Lebofsky (1986) compararam a forma de IRGs, chegando à conclusão de que as galáxias com $L_{8-1000\mu m} < 10^9 L_{\odot}$ em geral eram galáxias lenticulares e elípticas, com poucas espirais, embora a porcentagem de espirais cresça conforme cresce a luminosidade, com a maioria dos sistemas entre $10^{10} L_{\odot} < L_{8-1000\mu m} < 10^{11} L_{\odot}$ sendo classificados como Sb ou Sc. Eles

também reportaram que quanto maior a luminosidade infravermelha, maior a porcentagem de sistemas que aparentam estar envolvidos em interação, ou apresentam algum distúrbio morfológico, sendo que para a amostra apresentada, este valor era de aproximadamente 25% para galáxias com $L_{8-1000\mu m} > 10^{11} L_{\odot}$. Esta hipótese recebeu cada vez mais atenção com inúmeras publicações estudando a morfologia destas galáxias, e chegaram também à conclusão de que sistemas em fusão e interação são muito mais facilmente encontrados em LIRGs e ULIRGs em comparação a galáxias com baixa luminosidade infravermelha (e.g. Armus, Heckman & Miley, 1987; Melnick & Mirabel, 1990; Hutchings & Neff, 1991; Clements et al., 1996; Lawrence et al., 1989; Zou et al., 1991; Leech et al., 1994; Surace et al., 1998).

Resultados de simulações numéricas (Naab & Burkert, 2003; Springel & Hernquist, 2005; Robertson et al., 2006) mostraram que a evolução destas fusões, após a fase de ULIRGs terminava geralmente com uma galáxia elíptica, embora pudesse muitas vezes terminar em uma galáxia com um remanescente na forma de disco. Também mostraram que a fase ULIRG pode ser desencadeada mesmo antes da fusão, quando as galáxias estão apenas em interação mas separadas fisicamente.

Os primeiros resultados espectroscópicos no óptico mostraram que LIRGs e ULIRGs possuíam características indicativas de *starbursts* (Elston, Cornell & Lebofsky, 1985), embora amostras com espectros mais quentes, como indicados pela Figura 1.2, tivessem mais características de *Seyferts* ou LINERS (de Grijp et al., 1985; Osterbrock & de Robertis, 1985), ou até mesmo de quasares (Beichman et al., 1986). Em comparação, ULIRGs com espectro frio geralmente indicavam a presença de *starbursts* (Heckman, Armus & Miley, 1987; Armus, Heckman & Miley, 1988), muitas vezes com características espectrais de estrelas Wolf-Rayet, indicando uma formação estelar recente.

Já no infravermelho próximo, os primeiros estudos (Kim, Veilleux & Sanders, 1998; Veilleux, Kim & Sanders, 1999a) mostraram que a maioria das ULIRGs possui espectros característicos de *starbursts* recentes, mas que quanto maior fosse a luminosidade infravermelha, maior a probabilidade da galáxia hospedar um núcleo Seyfert 1 ou 2. Eles também encontraram que o avermelhamento óptico geralmente diminui conforme se afasta do centro da galáxia, e que taxas de formação estelar óptica são, na maioria dos casos, muitas vezes menores que aqueles derivados via infravermelho médio e distante.

Dando seguimento a este trabalho, Veilleux, Sanders & Kim (1997, 1999b) encontraram que em média 25% das ULIRGs possuem características de um AGN, e que quando consideradas apenas as ULIRGs com $L_{8-1000\mu\text{m}} > 10^{12.3} L_{\odot}$, esta fração chega próxima a 50%. Também verificaram que as ULIRGs com espectro infravermelho quente possuem uma probabilidade maior de apresentar linhas largas no infravermelho do que as com espectro frio. Observaram também que não há correlação entre extinção na região de linhas estreitas (Narrow Line Region - NLR) e a presença de linhas largas, sugerindo que a NLR e a região de linhas largas (Broad Line Region – BLR) não encontram-se na mesma linha de visão. Por último, verificaram que todos os objetos com linhas largas no infravermelho eram classificados como Seyfert 2 no óptico, com nenhum deles correspondendo a LINERs ou galáxias HII. Ainda, cerca de 70% destas ULIRGs possuem linhas largas também no infravermelho.

Recentemente, observações de (U)LIRGs têm sido feitas com IFUs. Westmoquette et al. (2012) realizaram um estudo da cinemática de 18 galáxias, encontrando 11 com evidências de *outflows* entre 500 e alguns milhares de km/s, e três com larguras de linhas acima de 2000 km/s. Medling et al. (2014) reportaram pela primeira vez evidências da presença de discos nucleares de gás em 16 de 19 ULIRGs e de estrelas em 11 das 11 ULIRGs, com discos de raios entre 50 e 800 pc e razão v/σ geralmente entre 1 e 5. Outros dois trabalhos foram feitos estudando a cinemática individual de galáxias (Alexander 2009 e Shih & Rupke 2010), ambas as galáxias possuíam prévias de *outflows*, que foram confirmados pelas observações de IFUs.

1.4 Objetivos do trabalho

Embora muitos estudos existam na área de LINERs, poucas conclusões existem a respeito da fonte central de ionização de objetos individuais, especialmente nas LIRGs e ULIRGs.

Comparando uma amostra espacialmente resolvida de LINERs pertencentes à classe de LIRGs com uma amostra de espectros integrados de LINERs ETGs, além de espectros ópticos unidimensionais para alguns dos objetos; pretendemos contribuir na discussão dos diferentes mecanismos de excitação da fonte de emissão em LINERs e suas diferenças entre as duas classes de objetos. Na busca por cenários possíveis, torna-se um fator primordial identificar os

componentes da população estelar capazes de ionizar o gás e produzir as propriedades observadas. Pretendemos, portanto, utilizar o método de síntese de população estelar para procurar por estrelas pAGB e/ou *starbursts*. Os resultados serão confrontados com aqueles obtidos através de diagramas de diagnóstico no óptico e infravermelho para avaliar o grau de atividade nuclear e estendida nestes objetos.

Neste contexto, o infravermelho próximo se torna uma ferramenta muito valiosa, já que as principais feições de estrelas TP-AGB encontram-se neste intervalo espectral, sendo estas responsáveis por, em média, 30 a 50% da luminosidade na banda K em galáxias com idades estelares entre 10^8 e 10^9 anos (Girardi & Bertelli 1998, Maraston 2005).

Além disso, outros objetivos em dados específicos são almejados:

- Em nossa amostra espacialmente resolvida, pretendemos também mapear a intensidade das linhas em emissão e a população estelar, a ser realizada através do programa *starlight* (Fernandes et al. 2005). Também pretendemos estudar a cinemática estelar e a cinemática do gás, procurando por possíveis *inflows*, *outflows* ou evidências de choques.
- Para as galáxias com dados ópticos, pretendemos também verificar o grau de confiabilidade da síntese de população estelar no infravermelho, comparando os resultados obtidos pela síntese nas duas regiões espectrais.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2, descrevem-se a amostra, as observações e a redução dos dados. No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada. Nos capítulos 4 e 5 são apresentados os resultados e discussões para a amostra de ETGs e de ULIRGs, respectivamente, e no capítulo 6 são sumarizadas as conclusões e perspectivas futuras deste trabalho.

CAPÍTULO 2

AMOSTRA, OBSERVAÇÕES E REDUÇÃO DE DADOS

Para este trabalho, utilizamos duas amostras de galáxias preferencialmente classificadas como LINERs, com algumas não-LINERs para controle. A primeira é composta por 8 galáxias observadas com o instrumento TripleSpec do telescópio Astrophysical Research Consortium (ARC) do Apache Point Observatory (APO), das quais 7 pertencem à classe de ETGs. A segunda amostra, por sua vez, é composta por três galáxias espacialmente resolvidas pertencentes à classe de LIRGs, para as quais obtivemos dados do instrumento NIFS do telescópio Gemini Norte.

Listamos neste capítulo as duas amostras, suas propriedades gerais e individuais, além de informações concernentes às observações e reduções dos dados.

2.1 Amostra APO

A amostra APO presente neste trabalho foi retirada do catálogo CALIFA (Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey). Os dados infravermelhos para esta amostra foram obtidos com o instrumento TripleSpec do telescópio ARC, nos dias 25, 26 e 27 de maio de 2013, juntamente com imagens de estrelas telúricas, arcos de Argônio-Xenônio, darks e flats (262013JH03, PI: Martins, Lucimara). O TripleSpec é um espectrógrafo de dispersão cruzada com cobertura espectral entre 0.95 e 2.46 μm . O instrumento é bem descrito por Wilson et al. (2004). Na Tabela 2.1, listamos as informações básicas para as 8 galáxias da amostra do APO encontradas no NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/>). Estas galáxias foram escolhidas por pertencerem à classe de ETGs (com exceção da NGC 5905) e serem observáveis a partir do APO, vistas as noites de observação.

Para quatro destas galáxias, estão disponíveis publicamente espectros ópticos obtidos com o Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Estes espectros foram retirados de <http://cas.sdss.org/dr6/en/tools/explore/>, onde estão armazenados todos os dados deste levantamento, já reduzidos e calibrados em comprimento de onda e em fluxo. O único tratamento adicional nestes dados foi a correção por deslocamento Doppler. A presença ou a ausência de dados SDSS dos objetos APO está indicada na Tabela 2.1 na coluna 'Dados Ópticos'.

Tabela 2.1 – Propriedades básicas da amostra APO. Valores e dados encontrados na literatura.

Nome	A.R.	Dec.	Morfologia	Magnitude (banda K)	redshift (z)	Espectro SDSS
NGC 4636	12h42m49.8s	+02d41m16s	E0-1	9.0	0.003129	Sim
NGC 5905	15h15m23.3s	+55d31m03s	SB(r)b	11.0	0.011308	Não
NGC 5966	15h35m52.1s	+39d46m08s	E	10.7	0.014924	Sim
NGC 6081	16h12m56.8s	+09d52m02s	S0	10.5	0.017265	Sim
NGC 6146	16h25m10.3s	+40d53m34s	E?	10.3	0.029420	Não
NGC 6338	17h15m23.0s	+57d24m40s	S0	10.6	0.027427	Sim
UGC 08234	13h08m46.5s	+62d16m18s	S0/a	10.7	0.027025	Não
UGC 10695	17h05m05.6s	+43d02m35s	E	11.3	0.027779	Não

Nas Figuras 2.1 e 2.2, mostramos as imagens 2MASS integradas nas bandas J, H e Ks das galáxias da amostra APO, juntamente com os espectros infravermelhos para cada uma delas. A posição da fenda é indicada para cada galáxia e foi sempre de zero graus. A largura da fenda foi de 1.1". A resolução espectral resultante é de $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx 3500$.

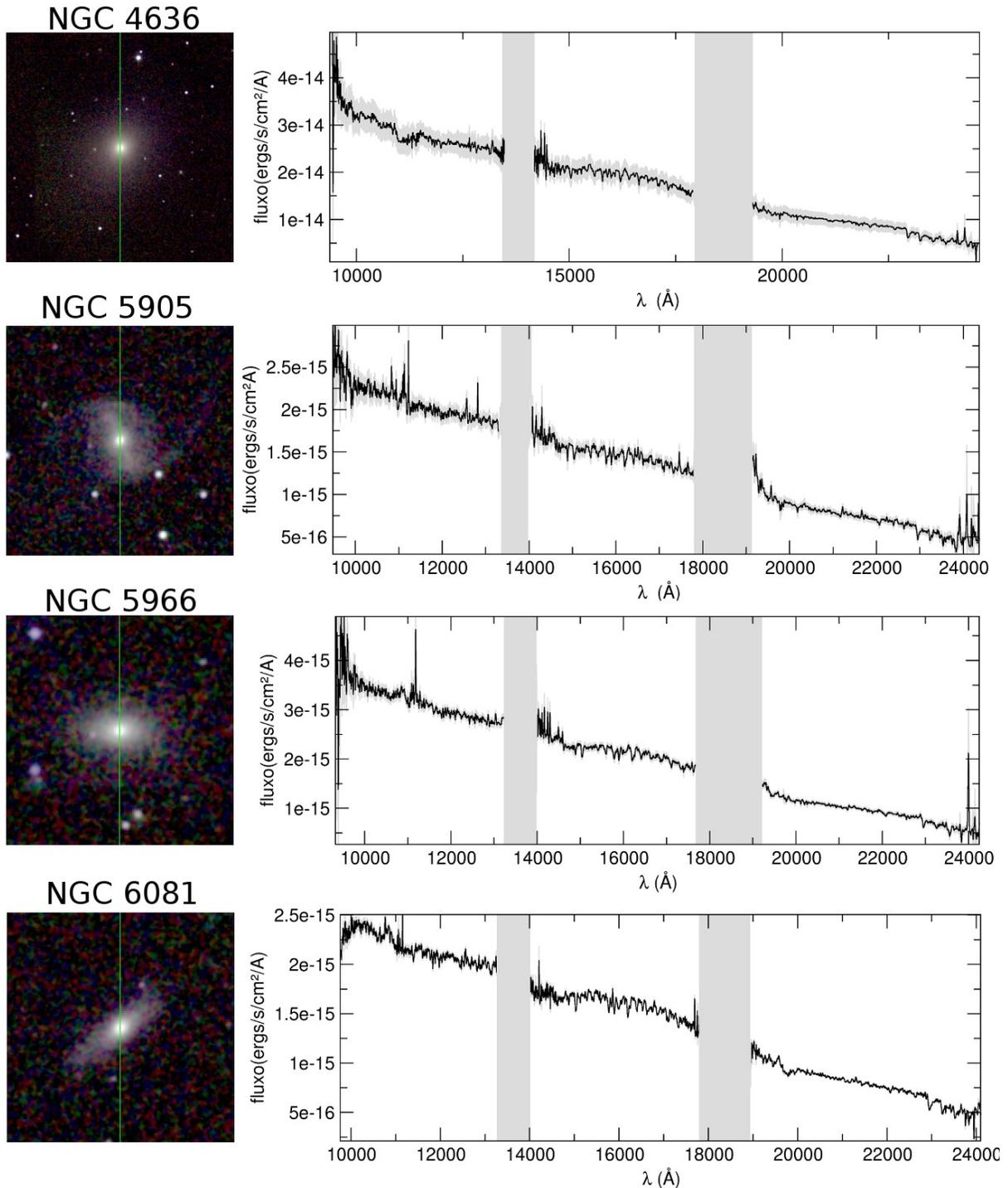


Figura 2.1 – À esquerda, imagem 2MASS e posição da fenda e à direita, espectro infravermelho para as galáxias NGC 4636, NGC 5905, NGC 5966 e NGC 6081. As faixas verticais em cinza correspondem às regiões onde a transmissão pela atmosfera terrestre é baixa, e, portanto, o espectro nestas regiões não é mostrado. As barras de erros para cada ponto espectral são mostradas em cinza. Em todas as Figuras, o norte está para cima e o leste para a esquerda.

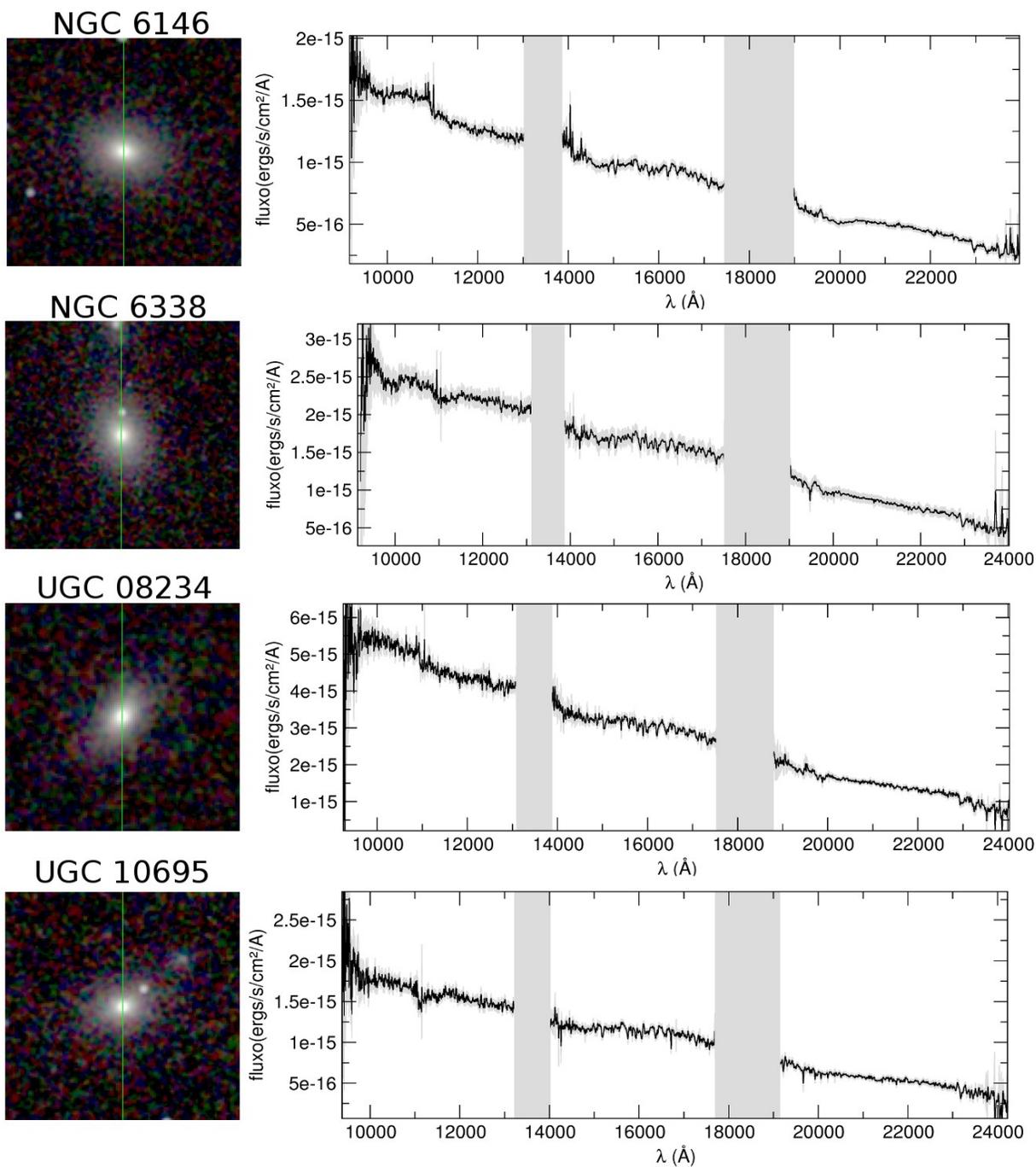


Figura 2.2 – Igual à Figura 2.1 para NGC 6146, NGC 6338, UGC 08234 e UGC 10695.

2.2 Amostra NIFS

A amostra NIFS presente neste trabalho foi retirada do catálogo revisado de galáxias brilhantes IRAS (IRAS Bright Galaxy Sample - RBGS) de Soifer et al. (1987), com 324 objetos com densidade de fluxo em 60 μm maior que 5.24 Jy. As três galáxias selecionadas, das quais duas possuem mecanismos de emissão LINER reportados na literatura, fazem parte de uma sub-amostra de 27 alvos escolhidos por se tratarem de galáxias do universo local pertencentes à classe de LIRGs. Na Tabela 2.2 estão listados os valores de ascensão reta (A.R.), declinação (dec.), fluxo IRAS em 12 μm , 25 μm , 60 μm e 100 μm , a morfologia, o *redshift* e o logaritmo da luminosidade $L_{8-1000\mu\text{m}}$, em luminosidades solares. Estas galáxias possuem $L_{8-1000\mu\text{m}}$ próximas a 10^{11} (L_{\odot}), sendo classificadas como LIRGs.

Tabela 2.2 – Propriedades básicas da amostra NIFS. Valores retirados de Sanders et al. (2003).

Nome	A.R.	DEC.	Fluxo IRAS (Jy)				Morfo- logia	z	$L_{8-1000\mu\text{m}}$ (L_{\odot})
			12 μm	25 μm	60 μm	100 μm			
UGC 00556	00:54:49	+29:14:42	0.34	0.45	5.57	10.84	Sb	0.01544	10.84
UGC 02982	04:12:22	+05:32:49	0.57	0.83	8.39	16.82	SB	0.01770	11.13
UGC 12914	00:01:40	+23:29:37	0.46	0.83	6.41	14.11	(R)S(r)cd pec	0.01451	10.93

Os dados foram obtidos no período entre 16 de outubro e 08 de novembro de 2010, através do instrumento NIFS (Near-Infrared Integral Field Spectrometer) do telescópio Gemini Norte em modo fila, pelo projeto GN-2010B-Q-26 (PI: Rodríguez-Ardila, A.). Para cada galáxia, seis exposições individuais de 180 segundos cada foram observadas em quatro diferentes bandas (z, J, H e K). Uma estrela telúrica foi observada imediatamente antes ou depois do alvo de ciência, para remoção das absorções atmosféricas e calibração em fluxo. As estrelas observadas foram estrelas A0V, A1V ou A2V, pois estas estrelas possuem o espectro na forma quase exata de um corpo negro e as absorções são causadas apenas por Hidrogênio, as quais são bem conhecidas. As

temperaturas destes corpos negros foram aproximadas para 9480, 9005 e 8810 para estrelas A0V, A1V e A2V, respectivamente.

Também foram observados darks, flats e flats Ronchi para redução dos dados e arcos de Argônio-Xenônio para calibração em comprimento de onda. As observações estavam programadas para serem feitas com o sistema de óptica adaptativa do Gemini Norte, Altair, mas por não ter um núcleo pontual que servisse como estrela de guiagem e não ter sido encontrada uma estrela de guiagem compatível em um raio menor que 5", o Altair não foi utilizado, de modo que os cubos são limitados por seeing, possuindo uma resolução máxima de 0.8".

Os espectros em z, por possuírem um ruído muito alto em comparação com o sinal (S/N não maior que 2 para o núcleo), não foram utilizados, de modo que apenas foram usados os espectros das bandas JHK, com $S/N \approx 8, 20$ e 38 respectivamente.

Nas Figuras 2.3 a 2.5 são mostradas imagens na banda K (2MASS) para as galáxias UGC 00556 e UGC 02982, assim como a imagem na banda K vista pelo telescópio TIRGO para a UGC 12914 com as escalas angulares indicadas. Em todas as galáxias é mostrado o campo de visão do NIFS, onde é mostrada a imagem integrada a partir dos cubos de dados das bandas J, H e K com as escalas de distância. O fluxo é medido em unidades de $\text{ergs cm}^{-1} \text{s}^{-2} \text{\AA}^{-1}$, e o centro do cubo é marcado com um X. Também são apresentados espectros integrados nas bandas J, H e K de uma região circular de 0.35 segundos de diâmetro centrada no pico máximo de luz das galáxias e indicada nessas Figuras. Nos espectros, são indicadas as linhas de emissão e bandas de absorção mais proeminentes.

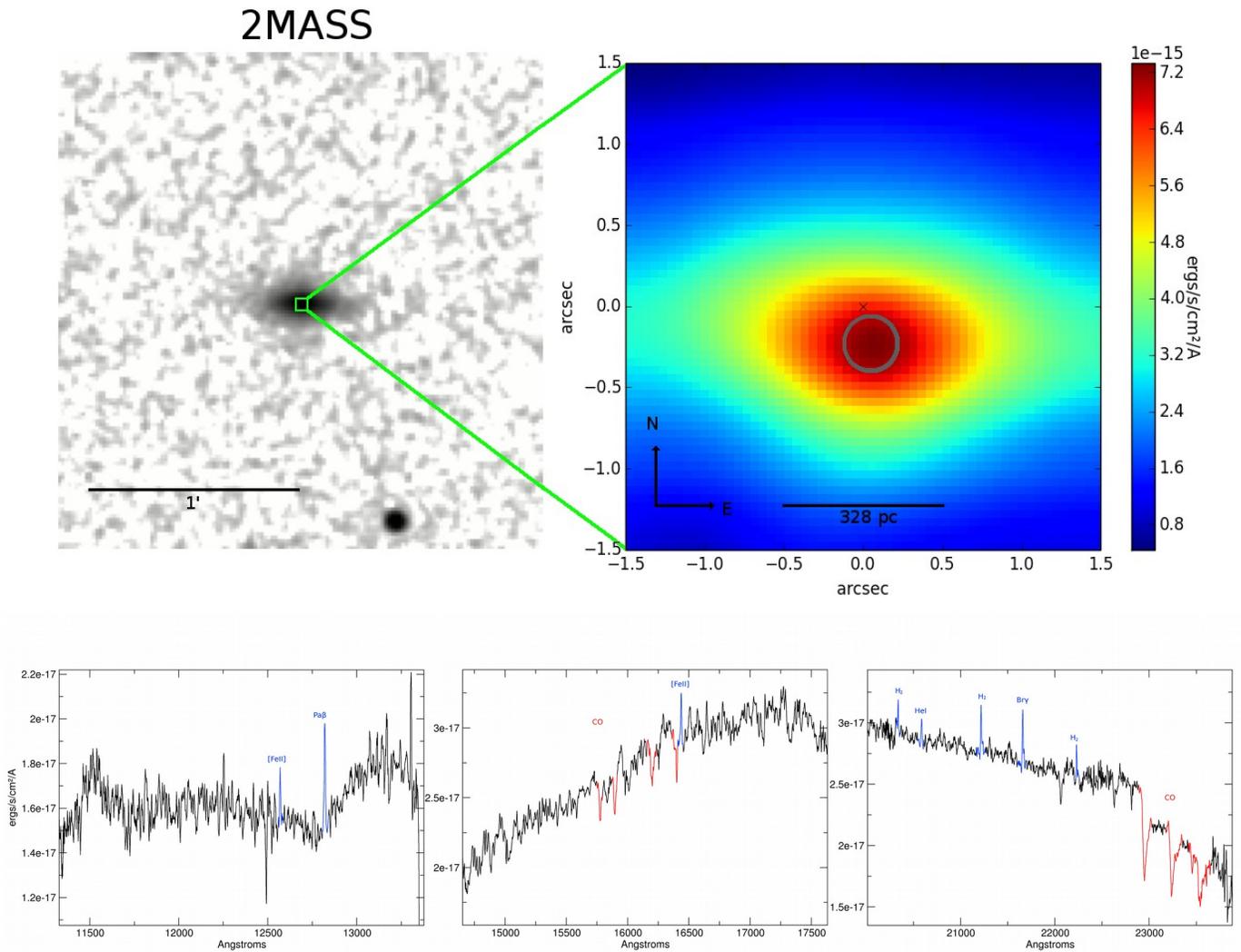


Figura 2.3 – No painel superior esquerdo, imagem da UGC 00556 obtida com o telescópio 2MASS, com a escala angular indicada. No painel superior direito, zoom do campo de visão NIFS, com fluxo integrado das bandas J, H e K em $\text{ergs cm}^{-1} \text{s}^{-2} \text{\AA}^{-1}$, onde está indicada a escala de distância. No painel inferior, espectro integrado da região circular de 0.35 segundos de diâmetro indicada na imagem NIFS em cinza, com as principais linhas de emissão e bandas de absorção indicadas.

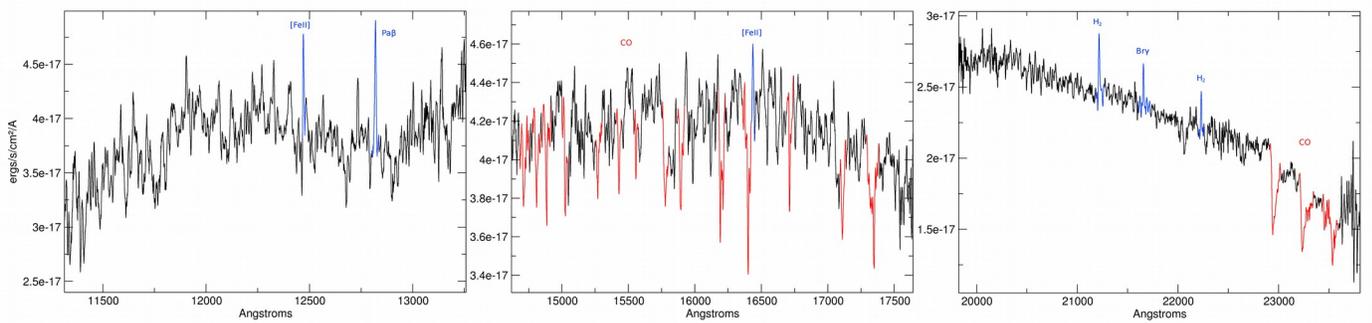
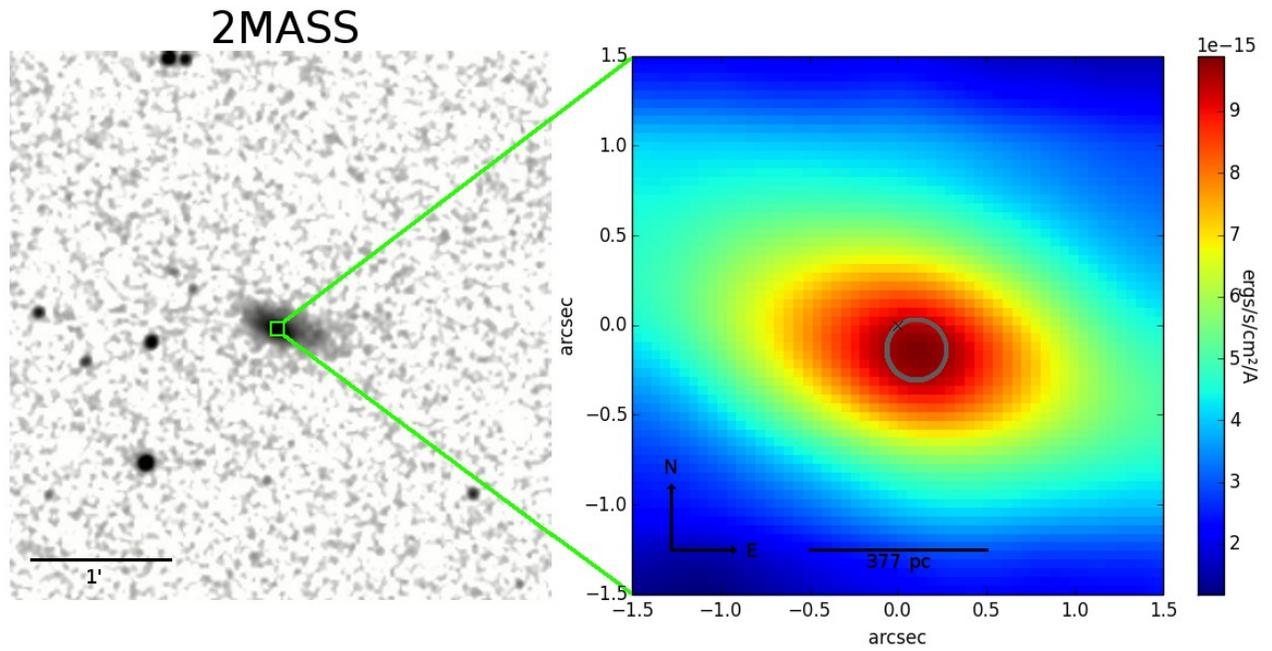


Figura 2.4 – Igual à Figura 2.3 para a UGC 02982.

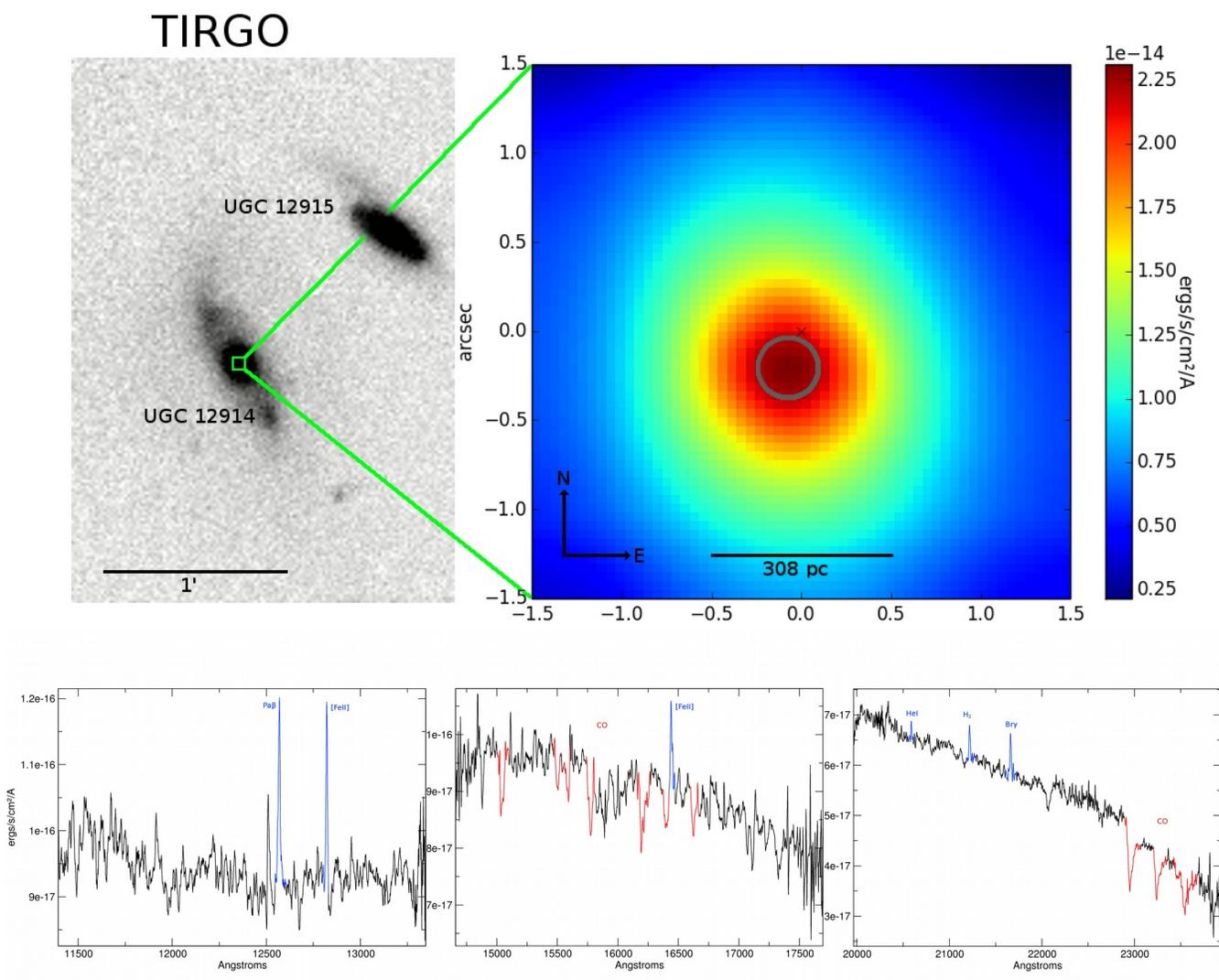


Figura 2.5 – Igual à Figura 2.3 para a UGC 12914.

Para duas das galáxias da amostra selecionada, a UGC 00556 e a UGC 02982, obtivemos através do NED, espectros no óptico, entre 3750 e 7900 Å, publicados por Kim et al. (1995), já reduzidos e calibrados, que foram corrigidos por deslocamento Doppler através do IRAF. Estes espectros foram obtidos com o telescópio Hale de 200 polegadas (5.1 m) localizado no observatório Palomar com o espectrógrafo duplo. As posições das fendas estão indicadas no painel superior da Figura 2.6. No painel inferior, são mostrados os espectros referentes.

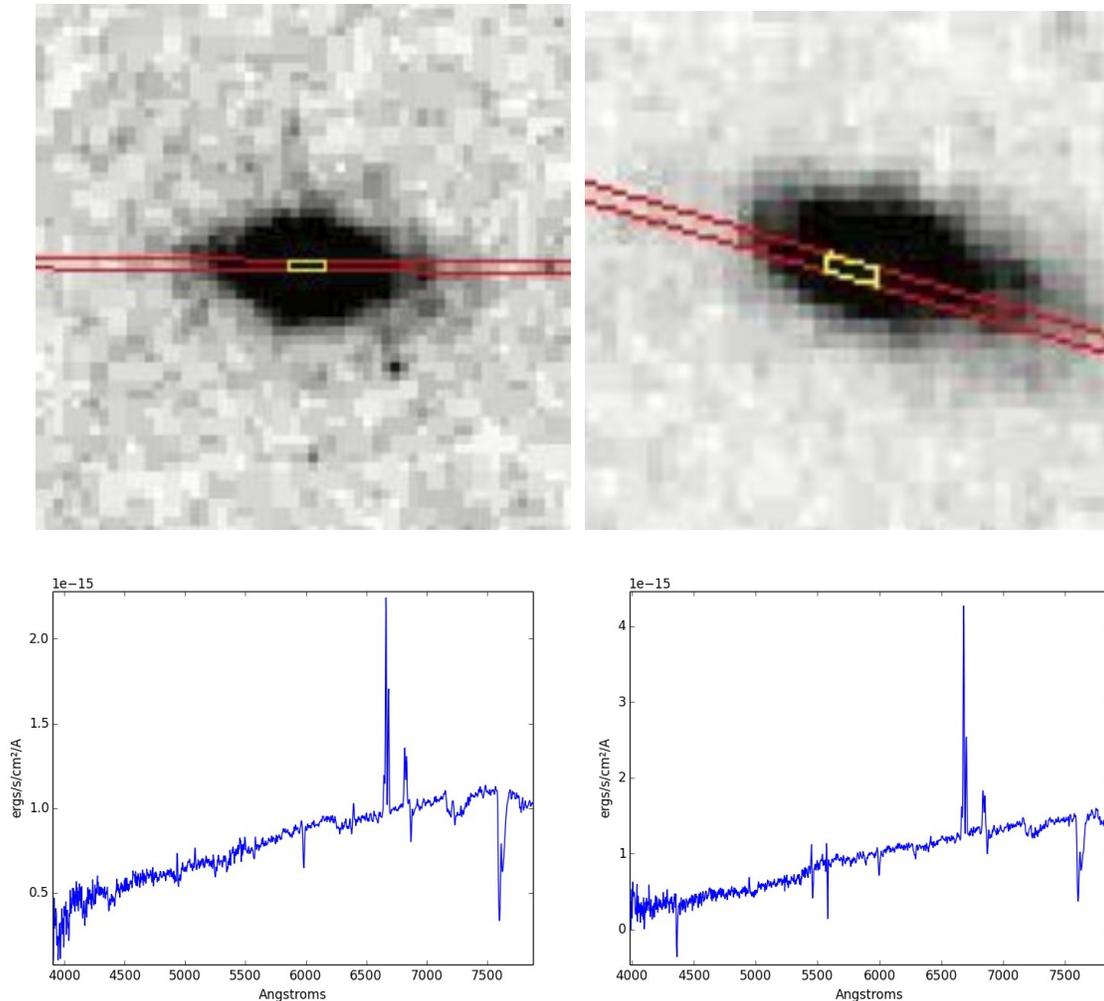


Figura 2.6 – Painel superior - posição das fendas para os dados ópticos. À esquerda, UGC 00556 e à direita UGC 02982. Painel inferior – espectros ópticos referentes.

2.3 Redução e calibração

Uma redução de dados típica no infravermelho consiste nos seguintes passos:

- Subtração do objeto e da estrela pelo céu.
- Normalização e divisão das imagens pelos flats.
- Extração e combinação dos espectros positivos e negativos da estrela e do objeto.
- Busca e aplicação da solução em comprimento de onda através do arco.
- Divisão pela estrela telúrica para a remoção de absorções atmosféricas.
- Calibração em fluxo.

A redução dos dados da amostra do APO foi feita por meio do programa TripleSpectool, em IDL, um pacote de redução de dados modificado a partir do Spextool (Cushing, Vacca & Rayner 2004; Vacca, Cushing & Rayner 2003) e disponível em <http://www.apo.nmsu.edu/arc35m/Instruments/TRIPLESPEC/#7>. Este pacote realiza uma redução de dados padrão, através dos passos descritos anteriormente. Após a redução dos dados, utilizando o IRAF (Image Reduction and Analysis Facility), um software específico para tratamento, visualização e redução de dados em astrofísica, corrigimos os espectros por redshift e aplicamos um filtro *boxcar* com o intuito de suavizar os espectros, maximizando a razão S/N.

Já os cubos de dados do Gemini foram reduzidos com os scripts padrão para os espectros NIFS disponíveis em <http://www.gemini.edu/sciops/instruments/nifs/data-format-and-reduction>. Estes scripts utilizam tarefas IRAF, e por se tratar de cubos de dados alguns passos adicionais são necessários:

- Preparação das imagens para o formato Multi Extension FITS, padrão do Gemini;
- Correção por distorção espacial através do flat Ronchi;
- Extração de uma imagem unidimensional para a estrela telúrica;

A seção 2.4 apresenta uma descrição do NIFS e dos tipos de imagens observadas.

2.4 O instrumento NIFS

O NIFS (McGregor et al., 2003) é uma unidade de campo integral, baseado no método AIS (Advanced Image Slicer) (Content 1997), instalado no telescópio Gemini Norte, e ilustrado na Figura 2.7. O NIFS é composto por 29 *slitlets*, que são pseudo-fendas verticais ao longo do eixo horizontal. Na maioria dos IFU's, a imagem é transmitida por fibras ópticas, enquanto que no NIFS esta transmissão ocorre por meio de espelhos. Quando a imagem entra no telescópio, ela é dividida por 29 espelhos levemente inclinados entre si, indicados por S1 na Figura 2.7. As imagens separadas são então projetadas para os espelhos S2, os quais as direcionam de modo que elas fiquem lado a lado ao passar pelo espectrógrafo, sendo então redirecionadas pelo espelho S3 ao CCD (*charge-coupled device*).

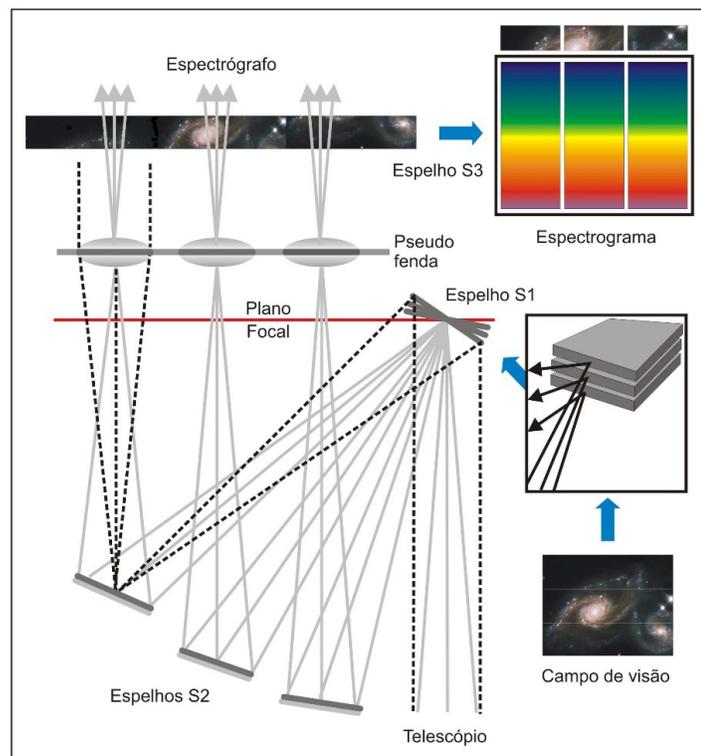


Figura 2.7 – Ilustração do princípio AIS. Retirado de Schönell Júnior (2013).

O CCD do NIFS possui 2048x2048 píxeis, dos quais os 4 píxeis das bordas não possuem sinal e servem apenas para orientação. Cada *slitlet*, está dividida em aproximadamente 60 *spáxeis* (com alguns pontos sem sinal para separar as *slitlets*, ver Figura 2.9) compostos cada um por

2040 pontos. O campo de visão, por fim, corresponde a uma área do céu de 3"x3". A Figura 2.8 ilustra de modo gráfico o cubo de dados obtido com este instrumento.

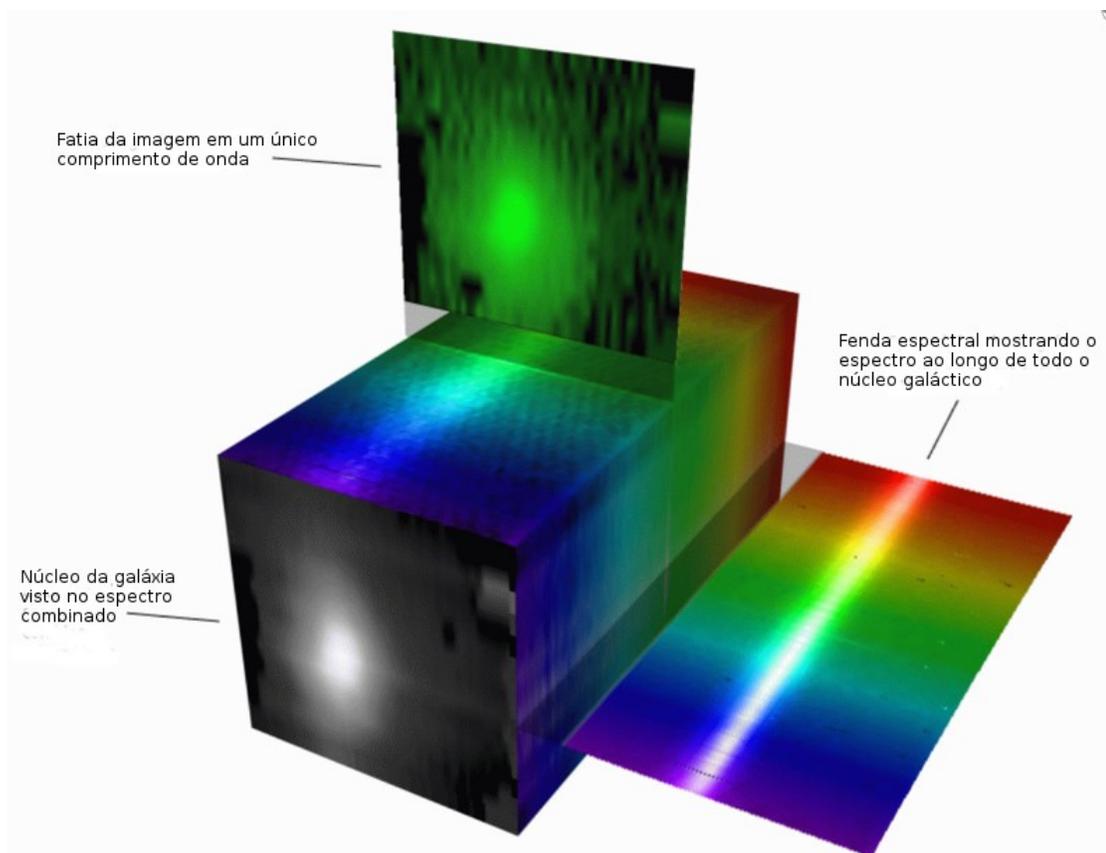


Figura 2.8 – Modelo de um cubo de dados

O NIFS possui uma resolução espectral $R=\lambda/\Delta\lambda$ de 4990 para a banda Z, 6040 para a banda J e 5290 para as bandas H e K. Cada *spáxel* possui uma resolução espacial de aproximadamente 0.103" na direção das slitlets e de 0.05" na direção dos *spáxeis*. O cubo, quando utilizado com o Altair (sistema de óptica adaptativa) pode atingir resolução angular de 0.1". Na Figura 2.9 são mostrados os tipos de imagem observados. A função de sensibilidade encontrada para o CCD do NIFS é mostrada na Figura 2.10.

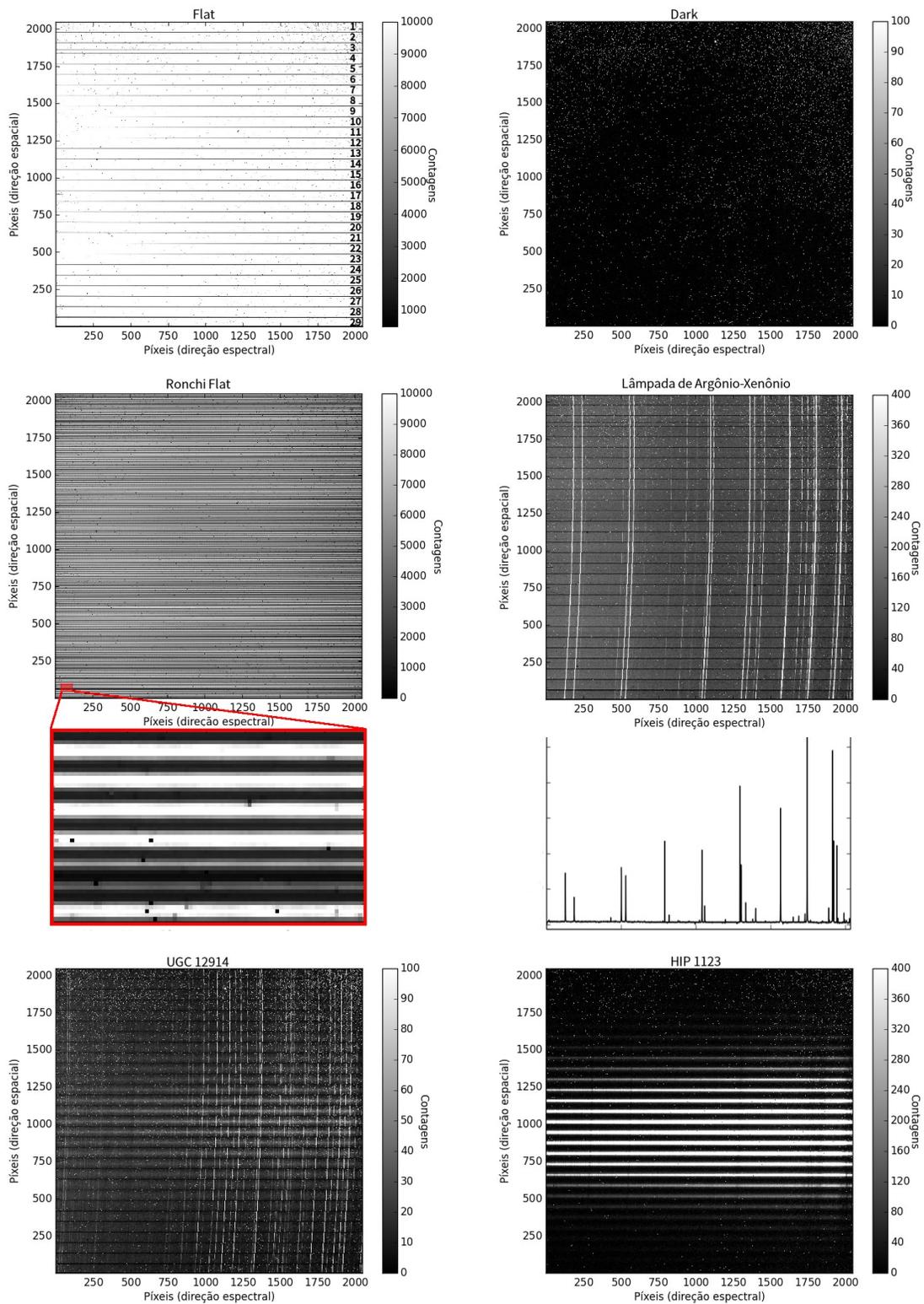


Figura 2.9 – Exemplos de arquivos fits obtidos com o NIFS.

2.5 Limitações dos scripts NIFS

Após a extração de um espectro unidimensional da estrela telúrica, deixamos de utilizar os *scripts* padrão do Gemini para os cubos NIFS, devido a algumas limitações:

- O *script* não remove as linhas de hidrogênio da estrela telúrica. Também constatamos que a normalização desta mesma estrela antes de sua utilização produz resultados melhores
- A incapacidade de calibrar um cubo em fluxo.
- A incapacidade de combinar os quatro cubos que obtivemos para cada banda de cada objeto ao final da redução.
- A incapacidade de corrigir por *redshift*.
- A incapacidade de combinar cubos de bandas diferentes.
- A falta de ferramentas para filtragem de ruído e melhora do S/N.

Para contornar o primeiro problema, através do espectro unidimensional da estrela, removemos as absorções de Hidrogênio ajustando gaussianas aos dados e posteriormente normalizamos o espectro da estrela. Integramos então uma circunferência de 0.5" do núcleo do objeto, e utilizamos a estrela normalizada para encontrar uma solução de valores de escala e deslocamento que melhor removesse as linhas de céu, aplicando então esta solução à todos os espectros do cubo.

Para o segundo problema, utilizando o contínuo da estrela, já livre de linhas de hidrogênio, e sabendo que estrelas A0V, A1V e A2V possuem uma forma aproximada de um corpo negro, comparamos o corpo negro esperado com o espectro observado e geramos a função de sensibilidade mostrada na Figura 2.10.

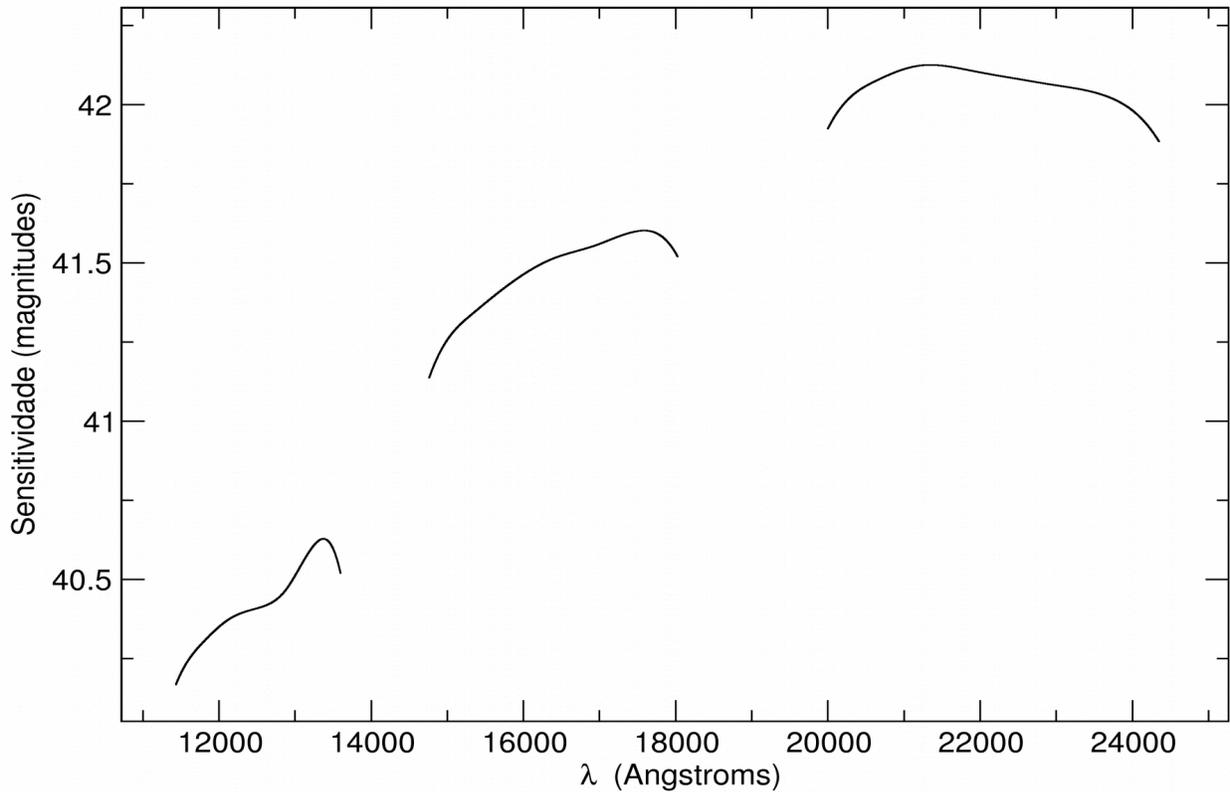


Figura 2.10 – Gráfico da função de sensibilidade do NIFS, em magnitudes, em função do comprimento de onda.

Para o terceiro problema, utilizando tarefas IRAF, arranjamos os cubos no formato tridimensional a partir dos dados bidimensionais utilizados até então. Neste ponto ficamos com 4 cubos da mesma região na mesma banda, que foram combinados em apenas um cubo para maximizar o S/N.

Para corrigirmos por deslocamento Doppler, obtivemos os valores de z através do NED, e com a tarefa dopcor do IRAF aplicamos a correção necessária.

Para combinarmos os cubos das diferentes bandas, desenvolvemos a tarefa *CubeCombine*, a qual disponibilizamos em <http://www.sites.google.com/site/luisgdh/astrophysics>. Esta tarefa

encontra o *spáxel* de cada cubo no qual o contínuo é maior, assume que todas as bandas possuem o pico no mesmo ponto (o que, especialmente para as LIRGs e ULIRGs, visto sua distribuição contínua de luminosidade, é uma hipótese válida) e combina os cubos, aproveitando apenas os pontos que possuem informação nas 3 bandas, cortando os demais pontos, que em geral eram entre 2 e 4 *spáxeis* em cada direção.

Para melhorar o S/N, utilizamos um filtro *boxcar* na dimensão espacial, que calcula a mediana dos 9 píxeis mais próximos e substitui o valor no píxel central. Como nossos cubos são limitados por seeing, isto evitou que eventos aleatórios não subtraídos pelo script chegassem ao cubo final, sem que houvesse perda de resolução espacial.

Também aplicamos um filtro Butterworth (Menezes, Steiner & Ricci 2014), que é um filtro aplicado diretamente no domínio das frequências da imagem. Este filtro examina as funções do domínio das frequências através de uma transformada de Fourier, analisa suas componentes e remove as frequências causadoras de ruído. Após a remoção, uma transformada inversa de Fourier completa o processo, e retorna o cubo com o ruído minimizado.

Combinados, estes filtros aumentaram consideravelmente o S/N, que era de 6, 17 e 20 em média no núcleo para 22, 35 e 40 para as bandas J, H e K, respectivamente.

2.5.1 Escalonamento

Devido ao fato de que as observações do mesmo objeto em bandas diferentes foram realizadas em noites diferentes, possivelmente com condições atmosféricas diferentes, os espectros possuíam um *offset* na escala de fluxo entre as diferentes bandas, como é possível ver no painel esquerdo da Figura 2.11. Para que a calibração em fluxo ficasse correta, utilizamos um espectro GNIRS (Gemini Norte) para a UGC 02982 e um espectro unidimensional OSIRIS (SOAR) para a UGC 12914, para nivelarmos os espectros. Ainda que a calibração em fluxo destes espectros (GNIRS e OSIRIS) não seja absoluta, o fato de serem observados com espectrógrafos de dispersão cruzada permite obter uma calibração relativa entre as bandas muito mais confiável. Isso porque todo o intervalo espectral coberto pelas bandas JHK é observado simultaneamente. Extraímos, a partir dos cubos de dados, uma área equivalente a área integrada

da fenda dos espectros GNIRS/OSIRIS e assumindo os espectros de fenda longa como corretos, multiplicamos os cubos pelo fator de escala entre as medidas. Os espectros para a galáxia UGC 02982 são mostrados na Figura 2.10, antes e depois do escalonamento.

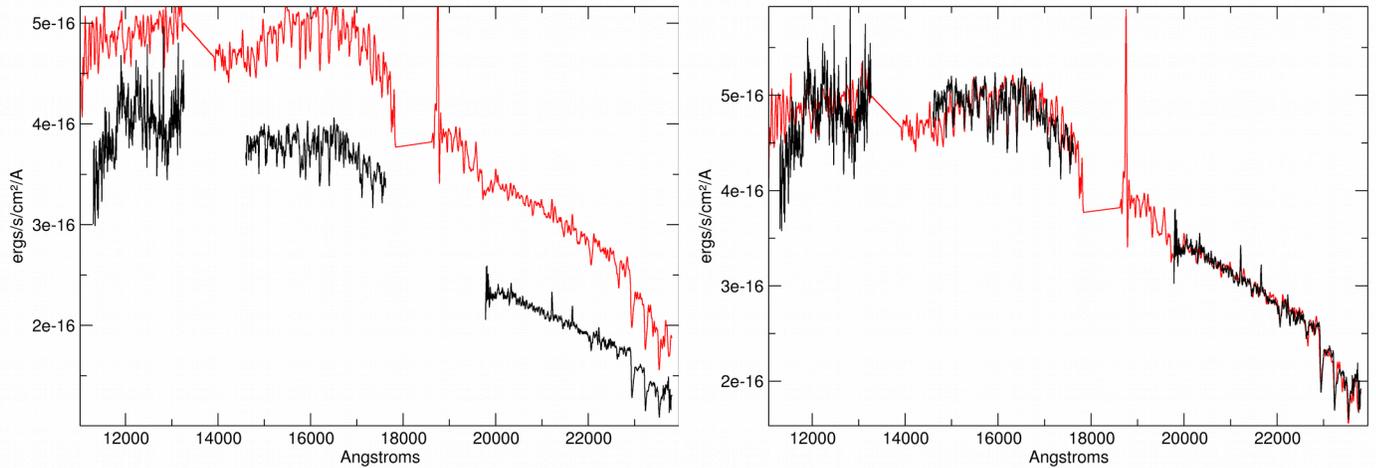


Figura 2.11 – Em vermelho o espectro obtido com GNIRS e em preto o espectro integrado correspondente à fenda do GNIRS obtido com o NIFS para a galáxia UGC 02982. À esquerda, espectro antes do escalonamento e à direita o espectro após escalonado. Os valores de escala foram 1.20 para J, 1.30 para H e 1.47 para K.

Para a UGC 00556, não dispúnhamos de espectros unidimensionais, de modo que nossa calibração relativa em fluxo possui um erro maior. Para calibrarmos este objeto, integramos o espectro em todo o campo do NIFS e, posteriormente, aplicamos a síntese de população estelar descrita na seção 3.2. Inicialmente, a síntese divergiu completamente, sinal de que o espectro estava mal calibrado. A calibração inicial é apresentada no painel superior da Figura 2.12. Escalonamos o espectro até encontrarmos uma calibração na qual a síntese convergisse. No painel inferior da Figura 2.12 mostramos a calibração adotada para este trabalho.

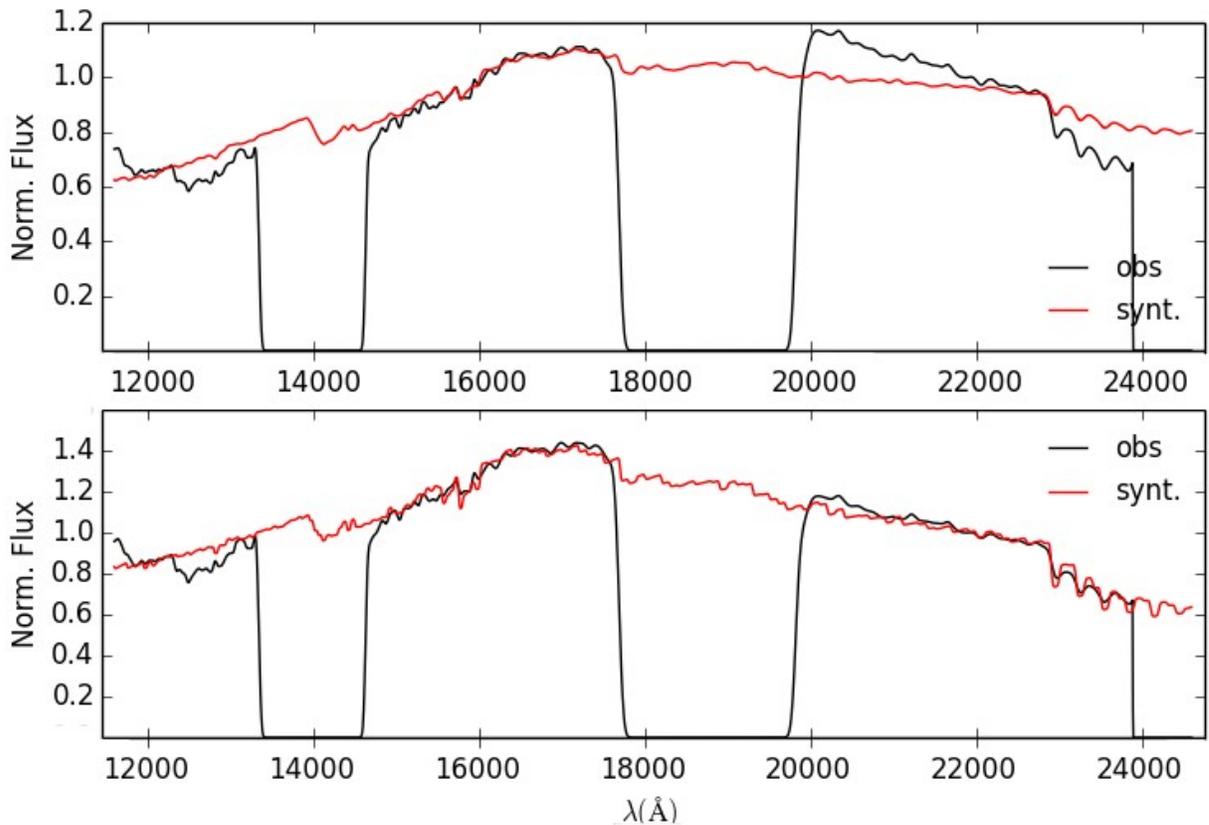


Figura 2.12 – Acima, espectros observado e sintetizado para os valores não escalonados da UGC 00556. Abaixo, espectros observado e sintetizado após o escalonamento.

2.6 Descrição individual da amostra

Nesta seção faremos uma breve descrição das principais características dos objetos que compõem a amostra APO e NIFS.

- NGC 4636

NGC 4636 é uma galáxia gigante elíptica com emissão LINER. É uma das elípticas mais próximas e uma das mais luminosas em raios-X, com $L_X \sim 2 \times 10^{41}$ ergs/s (Jones et al. 2002). Ela é

cercada por uma corona estensa de gás quente (Forman, Jones & Tucker, 1985), e possui uma distribuição assimétrica de gás, que pode ser o resultado de escoamentos irregulares (Stanger & Warwick, 1986). Também é emissora de OVIII, e suas razões de linha indicam que esta galáxia é afetada por espalhamento ressonante, o que sugere uma baixa turbulência (Pinto et al. 2014).

- NGC 5905

A galáxia NGC 5905 é uma das poucas galáxias que não possuía evidência prévia de um AGN, mas que teve erupções em raios-X observadas, nos anos de 1991 e 1992 através do telescópio Chandra. Posteriormente, o fluxo nesta banda começou a cair em uma taxa consistente com a esperada para uma fase de recuo de um evento TDE (*Tidal Disruption Event*), na qual uma estrela é absorvida por um buraco negro. Este evento para esta galáxia foi provavelmente causado por uma estrela da sequência principal (Lu et al. 2006). Observações recentes mostraram que o fluxo infravermelho é dominado por formação estelar, o que sugere que a emissão nuclear em rádio é gerada por formação estelar circumnuclear. Além disso, nenhuma emissão de rádio compacta associada com o evento TDE foi detectada (Raichur et al., 2015). Ela também recebe a classificação de galáxia HII (Veron-Cetty & Veron, 2006). Dentre todas as galáxias da amostra do APO é a única com sinais claros de linhas de emissão no infravermelho.

- NGC 5966

É uma galáxia elíptica com um indicativo extremamente sutil da presença de uma barra. As estrelas e o gás estão cinematicamente desacoplados, assim como o gás possui uma emissão mais alongada, de modo que um cone de ionização ou um disco rotacional desacoplado são duas interpretações possíveis (Kehrig et al. 2012). Segundo os mesmos autores, os diagramas de diagnóstico indicam a presença de um núcleo LINER e uma emissão de gás que se estende em alguns casos, até 5 kpc do núcleo, também do tipo LINER, que não varia significativamente com o raio ou a abertura, de modo que o mecanismo de ionização é provavelmente uma fonte central, embora a presença de uma ionização por estrelas pAGB não possa ser descartada.

- NGC 6081

Este objeto possui poucas informações na literatura. Trata-se de uma galáxia com emissão em rádio (Dressel & Condon, 1978) localizada em um z de 0.017265. O espectro SDSS está dominado por população estelar, com bandas de absorção proeminentes e linhas de [OIII], [NI], $H\alpha$ e [SII] características de LINERs. Seu espectro APO mostra uma fonte dominada por contínuo de natureza estelar com bandas proeminentes de CO e ausência de linhas em emissão.

- NGC 6146

A NGC 6146 é uma galáxia elíptica com emissão de um jato em rádio no centro do aglomerado de Abell (Wrobel et al., 1984). Caccianiga et al. (2002) reportaram a detecção de bandas em absorção de Ca II H e K, G, Mg Ib e Na Id, além de uma linha fraca de $H\alpha$ em emissão. Seu espectro APO mostra uma fonte dominada por contínuo de natureza estelar com bandas proeminentes de CO e ausência de linhas em emissão.

- NGC 6338

Esta galáxia é a mais brilhante da constelação de Draco. Ela possui filamentos difusos e ionizados de poeira e gás em escalas de kiloparsecs (Martel et al., 2004), e suas observações em raios-X indicam duas, ou possivelmente três cavidades de emissão, de formato elipsoidal com uma diminuição do fluxo superficial em raios-X. Também encontraram estruturas filamentosárias frias coincidentes com as estruturas de $H\alpha$ e com regiões de alta extinção vistas nos mapas de extinção ópticos, indicando um mecanismo de resfriamento gerado por poeira (Pandge et al. 2012). No mesmo trabalho, os autores reportaram que uma fonte de ionização pontual mais dura é necessária para gerar as características observadas e que a maior fonte de energia do jato em rádio é, provavelmente, mecânica.

- UGC 08234

Esta galáxia localiza-se em um grupo de galáxias, além de possuir uma companheira espiral, a galáxia UGC 08237 (Nilson 1973). Não existem propriedades reportadas na literatura em rádio ou raios-X. Seu espectro APO é dominado por população estelar, com proeminentes bandas de CO e ausência de linhas em emissão.

- UGC 10695

Esta galáxia possui uma emissão do tipo LINER (Veron-Cetty & Veron, 2006) sem propriedades em rádio ou raios-X reportadas na literatura. Seu espectro APO está dominado por população estelar, caracterizada por intensas bandas em absorção e ausência de linhas em emissão.

- UGC 00556

A UGC 00556 é um LINER (Sturm et al. 2006) que faz parte de um grupo de galáxias (Garcia 1993) e com uma distribuição assimétrica de luminosidade, de modo que Nilson (1973) sugeriu uma companheira superposta à ela. Seu espectro óptico observado com o telescópio Hale está dominado por população estelar, com poucas bandas em absorção proeminentes e intensas linhas em emissão de H β , [OIII], [NI], H α e [SII]. Seu espectro NIFS está dominado por população estelar e linhas de emissão de [FeII], Pa β , HeI, Bry e H $_2$ que se estendem por todo o campo do IFU.

- UGC 02982

A UGC 02982 é uma galáxia isolada com emissão em rádio difusa e que se estende a 45" (Schmitt et al., 2006). Possui uma cauda assimétrica (Karachentseva, 1973), além de ser uma

galáxia SFG (Star Forming Galaxy) com poucas linhas em emissão (Riffel, Rogério et al. 2013). Seu espectro óptico observado com o telescópio Hale está dominado por população estelar, com poucas bandas em absorção proeminentes e intensas linhas em emissão de H β , [NI], H α e [SII]. Seu espectro NIFS está dominado por população estelar e linhas em emissão de [FeII], Pa β , H $_2$ e Br γ que se estendem por todo o campo do IFU.

- UGC 12914

A UGC 12914 é uma galáxia LINER peculiar em interação com a UGC 12915 (Thomas et al. 2004). Metade da emissão rádio emitida em 1.4-GHz pelo sistema encontra-se na ponte ligando as duas galáxias, assim como uma grande quantidade de hidrogênio (Condon et al., 1993). Seu espectro infravermelho está dominado por população estelar com linhas em emissão de [FeII], Pa β , HeI e Br γ restritas ao núcleo e linhas de e H $_2$ que se estendem por todo o campo do IFU.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentamos a metodologia utilizada para realizar a análise dos dados espectroscópicos das duas amostras. Os resultados e as discussões individuais são apresentados no capítulo 4 para a amostra do APO e no capítulo 5 para a amostra NIFS.

3.1 Análise das linhas de emissão

As características espectrais mais simples de se identificar são linhas de emissão, cada uma correspondendo a uma transição específica de determinado elemento em um determinado estado. Para os espectros infravermelhos, foram encontradas linhas de [FeII] λ 12570 Å e λ 16440 Å, Pa β λ 12820 Å, H₂ λ 20330 Å, λ 21218 Å e λ 22230 Å, HeI λ 20588 Å e Br γ λ 21660 Å. Focamos nossa discussão nas linhas de [FeII] λ 16440 Å, H₂ λ 21218 Å, HeI λ 20588 Å e Br γ λ 21660 Å por serem as linhas com melhor S/N. Já no óptico, embora tenham sido encontradas outras linhas, focamos nossas discussões nas linhas de H β λ 4861 Å, [OIII] λ 5007 Å, H α λ 6563 Å e [NII] λ 6583 Å pois são as linhas necessárias para caracterizar o nível de atividade de um objeto (AGN, LINER, galáxia HII, *starburst*) através de diagramas BPT (Baldwin et al. 1981).

Estas linhas usualmente possuem um perfil gaussiano. Sua posição, intensidade e largura nos dão informação a respeito das propriedades físicas do gás. As características da linha também são afetadas em função do processo envolvido na sua geração, por exemplo, choques, *outflows* ou fotoionização por uma fonte central.

Em alguns casos nos quais há a presença de um núcleo ativo de galáxia, o perfil da linha mostra distorções em relação a um perfil gaussiano, que geralmente é ajustado por várias gaussianas ou séries de Gauss-Hermite (e.g. Riffel, Rogério et al. 2009).

Para o ajuste das linhas de emissão no infravermelho, primeiro subtraímos o contínuo dos cubos através do programa *QfitsView* (disponível em <http://www.mpe.mpg.de/~ott/QfitsView/>), aplicando a cada *spáxel* um filtro *boxcar* que calcula a mediana dos 101 píxeis espectrais próximos, 50 à direita, 50 à esquerda mais o píxel central, substituindo o valor do píxel central por esta mediana. Este método se mostrou mais eficiente que o método de ajuste de função *spáxel* a *spáxel*, já que o ajuste deveria ser repetido para cada linha encontrada e, para algumas linhas, especialmente as mais próximas à borda, o ajuste não conseguia encontrar o contínuo.

Após termos os cubos com o contínuo subtraído, desenvolvemos um *script* em python que, para cada linha em emissão detectada em cada *spáxel* de um cubo de dados, automaticamente ajusta uma função gaussiana, dada por

$$G(x) = \frac{f}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-d)^2}{2\sigma^2}}, \quad [\text{eq 3.1}]$$

pelo método dos mínimos quadrados, no qual σ é o desvio padrão, f é o fluxo (que pode ser obtido integrando a gaussiana no intervalo $]-\infty, +\infty[$) e d é o centro da gaussiana. A qualidade do ajuste é determinada pelo fator de convergência, no qual 1 significa uma convergência excelente e 5 significa uma divergência. Para todos os valores com S/N alto o fit convergia, especialmente para as linhas mais intensas, mas para valores com S/N baixo, o fit, em geral, divergia. Este *script*, após ajustar todas as gaussianas de cada linha, armazena os resultados em mapas, um para intensidade, posição do centróide da linha, dispersão e um último para a qualidade do ajuste. Disponibilizamos este *script* em <http://www.sites.google.com/site/luisgdh/astrophysics> com o nome de *fitcube*. Os pontos nos quais o valor referente à qualidade do ajuste era maior que 3 foram mascarados em nossos mapas.

Mostramos, na Figura 3.1, ajustes realizados pelo *fitcube* para a linha de Br γ para seis pontos da galáxia UGC 02982 (o núcleo luminoso, 4 pontos localizados à 0.8 segundos de arco ao norte, sul, leste e oeste e para o pico na emissão de Br γ). Os dados são apresentados em preto e o ajuste realizado pelo programa *fitcube* é apresentado em vermelho.

Na Figura 3.2, são mostrados dois ajustes da linha de H $_2$ λ 22230 Å da galáxia UGC 12914 que divergiram completamente.

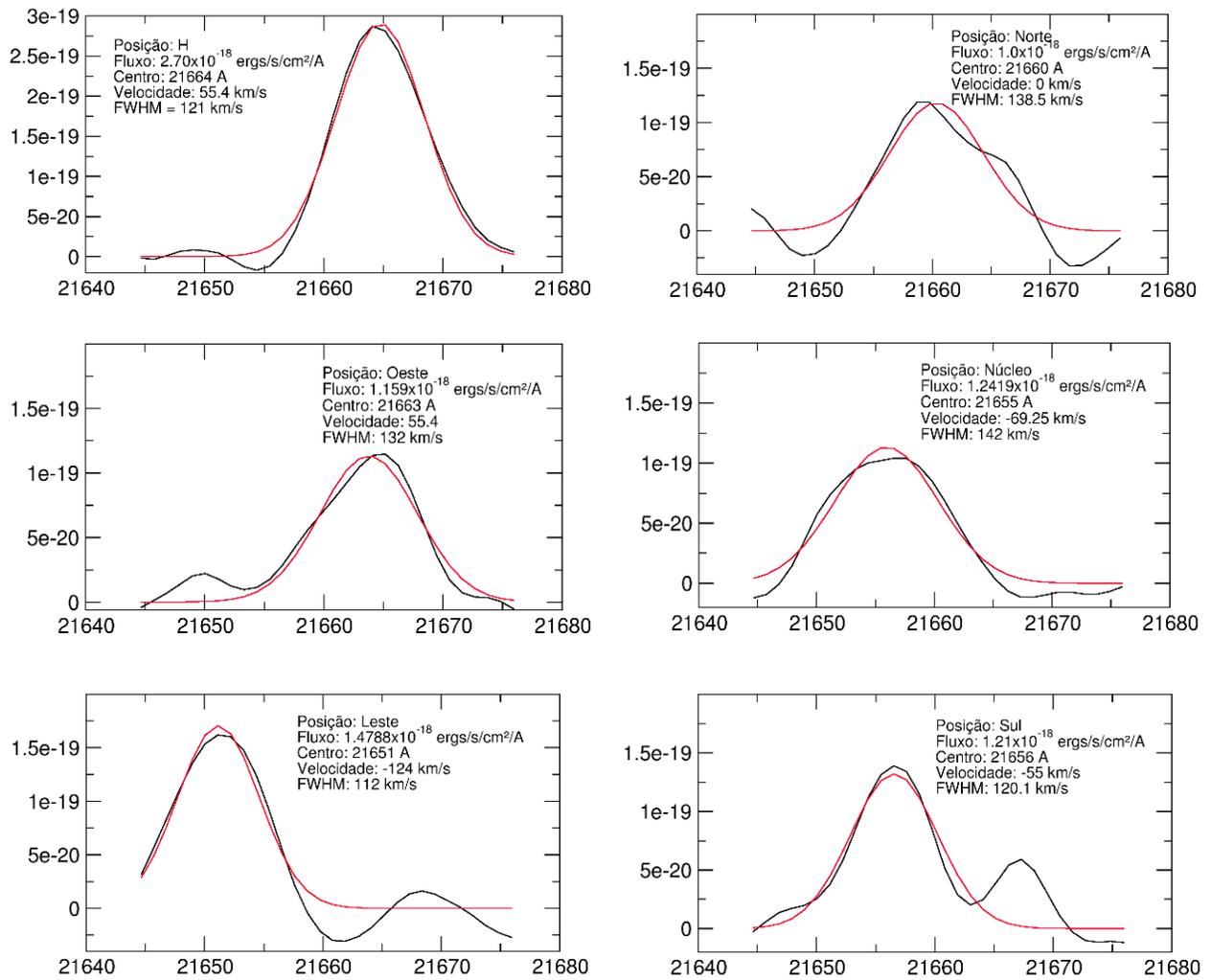


Figura 3.1 – Exemplos de ajustes de gaussianas para seis pontos da galáxia UGC 02982 para a linha de Bry feitos pelo programa *fitcube*. Os dados são mostrados em preto e os ajustes em vermelho. O comprimento de onda está em Angstroms e o fluxo em ergs/s/cm²/Å.

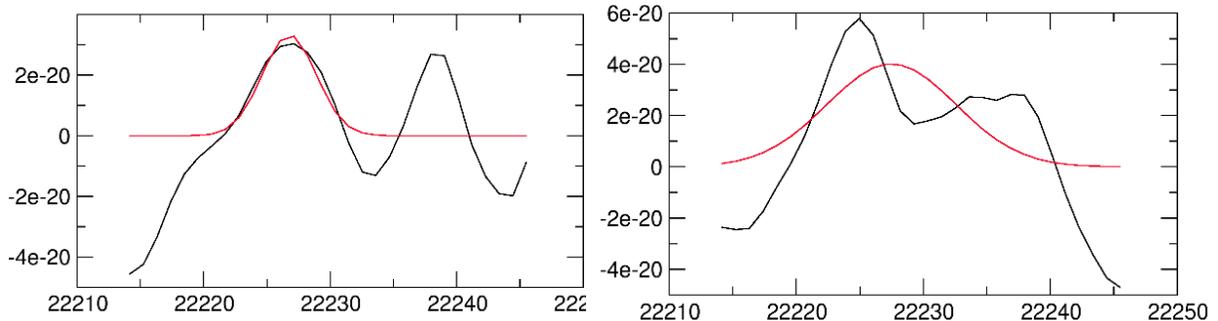


Figura 3.2 – Exemplos de ajustes divergentes da linha de H₂ λ 22230 Å para a UGC 12914.

3.1.1 Razões de linha

Outra ferramenta que será utilizada no presente trabalho são as razões de linha. Segundo Rodríguez-Ardila et al. (2004), as razões das linhas infravermelhas [FeII] λ 12570 Å/Pa β e H₂ λ 21218 Å/Bry podem ser usadas para se estudar os mecanismos de excitação do gás em função de sua posição em um diagrama de diagnóstico. No entanto, existem controvérsias para objetos individuais. Martins et al. (2012) encontraram, para a galáxia NGC 185 que, embora este objeto apresente razões de linha típicas de Seyferts, suas propriedades são melhor explicadas por uma combinação de nebulosas planetárias e remanescentes de supernovas.

Como a linha de [FeII] λ 12570 Å para os nossos dados possui um baixo S/N, utilizamos o diagrama de Colina et al. (2015), que é dado em função das razões de [FeII] λ 16440 Å/Bry e H₂ λ 21218 Å/Bry, mostrado no painel esquerdo da Figura 3.3.

Diagramas também podem ser utilizados no óptico. No painel direito da Figura 3.3, apresentamos o diagrama BPT (Baldwin , Phillips & Terlevich, 1981) retirado de Bamford et al. (2008), que utiliza as razões de linhas de [OIII] λ 5007 Å/H β e [NII] λ 6583 Å/H α para classificar os objetos.

Outro uso possível das razões de linha é estimar o avermelhamento que afeta o gás emissor. Isto pode ser feito utilizando linhas que possuam razões intrínsecas constantes mas que estejam afastadas significativamente em comprimento de onda, como é o caso das linhas de Pa β e Bry. Segundo Storchi-Bergmann et al. (2009), o avermelhamento deduzido a partir destas razões, e usando a lei de avermelhamento de Cardelli, Clayton & Mathis (1989) pode ser dado por

$$E(B - V) = 4.74 \times \log \left(\frac{5.88}{F(Pa\beta)/F(Bry)} \right), \quad [\text{eq 3.2}]$$

com $F(Pa\beta)$ sendo o fluxo da linha de Pa β , $F(Bry)$ o da linha de Bry e 5.88 a razão intrínseca entre as duas linhas. Nossos resultados são apresentados em termos de A_v , e convertidos por meio da relação linear

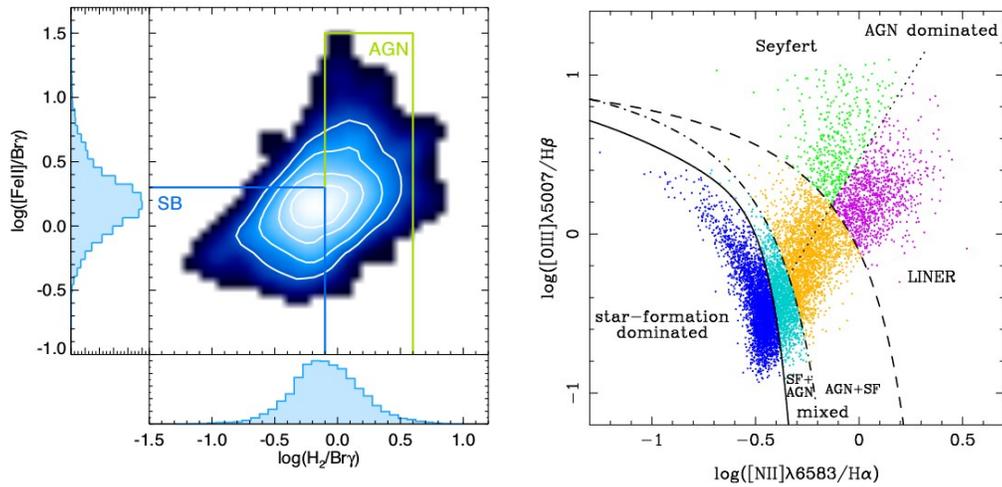


Figura 3.3 – Diagramas de diagnóstico no infravermelho (painel esquerdo) e no óptico (painel direito).

$$A_v = \frac{E(B-V)}{3.1}. \quad [\text{eq 3.3}]$$

No óptico, todas as medidas de fluxo foram realizadas após a subtração da componente estelar. No infravermelho, no entanto, não realizamos esta subtração dada a baixa resolução dos modelos, de modo que estas medidas podem conter uma subestimativa de até 20%.

3.1.2 Taxa de formação estelar através das linhas de Hidrogênio

Segundo Kennicutt (1998), um dos métodos possíveis de se utilizar para medir a taxa de formação estelar (Star Formation Rate - SFR) em galáxias é traçando o fluxo das linhas de emissão nebulares que re-emitem a luminosidade estelar integrada abaixo do limite de Lyman incidente. Como apenas estrelas com massas maiores que $10 M_{\odot}$ contribuem significativamente para o fluxo capaz de causar a ionização do gás, este método fornece uma medida direta e sensível da população jovem e massiva, independente da história de formação estelar da galáxia, desde que não haja a presença de um núcleo ativo na galáxia.

Segundo Kennicutt et al. (1994) e Madau et al. (1998), a SFR pode ser medida para uma galáxia através do fluxo da linha de $H\alpha$ emitida pela galáxia, através da relação

$$SFR = 7.9 \times 10^{-42} L_{H\alpha}, \quad [\text{eq. 3.4}]$$

com a SFR em unidades de M_{\odot}/ano , onde $L_{H\alpha}$ é a luminosidade total de $H\alpha$ emitido pela galáxia, em ergs/s, ou ainda pelo fluxo da linha de Bry , com a SFR dada por

$$SFR = 8.2 \times 10^{-40} L_{Bry}, \quad [\text{eq 3.5}]$$

onde L_{Bry} é a luminosidade total de Bry emitido pela galáxia, em ergs/s.

Como apenas uma pequena parte do fluxo emitido atinge o telescópio, é necessário recuperar a informação a respeito da luminosidade total que foi emitida pela galáxia. Assumindo que uma esfera de raio r (Mpc) possui uma área A (cm^2) dada por $A(\text{cm}^2) = 1.2 \times 10^{50} r(\text{Mpc})^2$, e que as distâncias seguem uma Lei de Hubble $D = v/H_0$, com $H_0 = 67 \text{ km/s/Mpc}$ (Planck Collaboration, 2013), sendo a velocidade v dada em função do redshift z por $v = z \cdot c$, obtemos finalmente as relações

$$SFR = 1.90 \times 10^{16} \cdot F_{H\alpha} \cdot z^2 \quad [\text{eq 3.6}]$$

$$e \text{ SFR} = 1.97 \times 10^{18} \cdot F_{\text{Br}\gamma} \cdot Z^2, \quad [\text{eq 3.7}]$$

onde $F_{\text{H}\alpha}$ e $F_{\text{Br}\gamma}$ são os fluxos por unidade de área, dados em ergs/s/cm².

3.2 Análise do contínuo

Quando analisa-se o espectro de uma estrela, é possível estimar valores para idade, massa, temperatura efetiva, raio, gravidade superficial e composição química. Para tal, compara-se o espectro da estrela com espectros de estrelas conhecidas e, a partir destes, identifica-se a qual classe a estrela pertence.

Quando observamos uma imagem ou espectro de uma galáxia, não é possível separar estrelas para estudá-las individualmente, e o que observamos é, na verdade, a soma de todos os espectros estelares integrados ao longo da linha de visada. Ao estudar o contínuo, seja através de uma análise cinemática ou uma análise de sua composição, buscamos recuperar estas informações ao longo da linha de visada.

Como nossas galáxias não possuem um núcleo ativo de alta ionização, o contínuo observado é constituído principalmente por estrelas. No infravermelho, a forma do contínuo estelar se aproxima muito do espectro de um corpo negro, com diversas absorções, sendo as bandas de CO as mais proeminentes. Na Figura 3.4, mostramos espectros de cinco populações estelares simples (*Simple Stellar Population* – SSP) entre 10000 e 25000 Å retiradas de Maraston (2005), com $Z=0.01 Z_{\odot}$ e idades de 1, 3, 3.5, 4 e 5 milhões de anos.

Sendo assim, estuda-se a população como um todo, comparando o espectro observado a vários modelos de populações estelares de diferentes idades e metalicidades, e identificando qual a porcentagem de estrelas jovens, estrelas intermediárias e estrelas velhas presentes em sua composição.

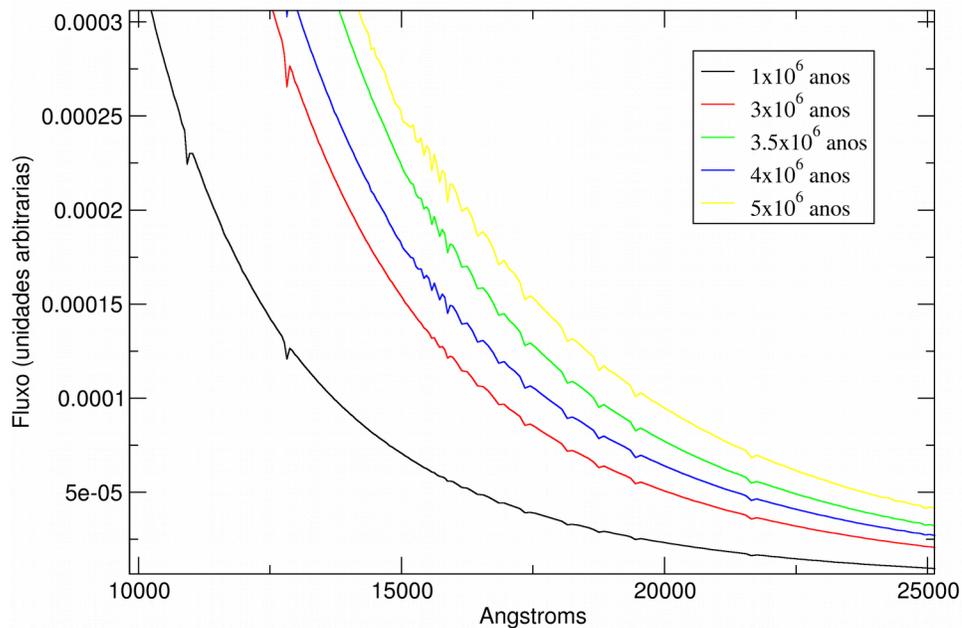


Figura 3.4 – Espectro de cinco SSPs retiradas de Maraston (2005), com metalicidade de $Z=0.01 Z_{\odot}$ e idades de 1, 3, 3.5, 4 e 5 milhões de anos.

Estes modelos são chamados de populações estelares simples por serem calculados a partir de populações estelares de mesma idade e composição química (Renzini, 1981). Os modelos adotados neste trabalho foram apresentados por Maraston (2005). Eles foram construídos combinando espectros teóricos para então produzir o espectro integrado da SSP. Os espectros teóricos, por sua vez, foram construídos baseando-se no teorema do consumo de energia, onde a variável de integração é a quantidade de combustível consumida através da queima nuclear além da sequência principal. Os espectros utilizados são sempre obtidos a partir de grandes bibliotecas estelares, sejam elas observadas ou construídas à partir de modelos teóricos, sempre cobrindo uma ampla extensão de parâmetros.

3.2.1 Síntese de população estelar no óptico

Sínteses espectrais no óptico são extremamente comuns, além de possuírem diversas facilidades, em especial a grande quantidade de absorções presentes nesta região e a enorme gama de bases disponíveis.

No entanto, dois problemas emergem nesta região espectral. O primeiro é a sua sensibilidade à poeira, que faz com que regiões mais internas sejam inacessíveis, e o segundo é a extrema semelhança espectral entre uma lei de potência e uma população jovem avermelhada, semelhança esta que se intensifica no extremo azul do óptico, tornando as duas componentes praticamente indistinguíveis. Embora esta dificuldade exista também no infravermelho, ela é maior no óptico, onde a diferença principal entre uma população estelar com 5Myr e uma lei de potência com um avermelhamento de $A_V \sim 2-3$ magnitudes é a presença das absorções de Balmer e o salto de Balmer.

3.2.2 Síntese de população estelar no infravermelho

Estudar a população estelar no infravermelho possui algumas dificuldades, especialmente pelo fato de não ser possível obter um resultado confiável caso os modelos não incluam a fase de ramo gigante assintótico (AGB - Asymptotic Giant Branch, Origlia & Oliva 2000), a extrema similaridade espectral entre uma população jovem e uma lei de potência avermelhada (Riffel, Rogério. et al. 2009) e a limitação de bibliotecas disponíveis. Embora existam para o óptico diversas bibliotecas estelares com boa resolução e boa cobertura espectral, poucas são as possibilidades para o infravermelho (Röck et al. 2015).

Em compensação, as recompensas desta região espectral são imensas. Como já mencionado, quando observamos uma galáxia em comprimentos de onda visíveis, estamos, em geral, observando uma camada externa desta mesma galáxia, de modo que informações sobre as regiões mais internas não estão acessíveis. O infravermelho, por sua vez, é menos sensível à presença de poeira, de modo que é possível se estudar as regiões mais internas das galáxias, que não são acessíveis no visível.

Outra grande vantagem do infravermelho próximo é que as principais características para se diferenciar supergigantes e estrelas AGB termicamente pulsantes encontram-se nesta região. No óptico, essas duas classes não podem ser facilmente identificadas, de modo que a síntese é mais sensível neste intervalo espectral à esta população (Oliva et al. 1995; Maraston 1998, 2005).

Como estas duas classes são as principais indicadoras de *starbursts*, e muitas vezes as regiões *starburst* estão em um núcleo altamente obscurecido por poeira, o NIR se torna uma ótima região espectral para a identificação e diferenciação das características de galáxias *starburst* e para procura de estrelas capazes de ionizar o gás.

3.2.3 A base

O elemento mais importante em uma síntese de população estelar é a base (Riffel, Rogério et al. 2009). Uma base ideal deve cobrir as propriedades de idade e metalicidade da galáxia em estudo com resolução suficiente para que suas propriedades sejam resolvidas (Schmidt et al. 1991; Fernandes et al. 2005).

A base escolhida para a síntese foi a biblioteca de Maraston (2005), que inclui estrelas do ramo AGB e supergigantes, necessárias para a síntese no infravermelho. As SSP's utilizados neste trabalho foram distribuídos em 31 idades (0.001, 0.003, 0.0035, 0.004, 0.005, 0.0055, 0.006, 0.0065, 0.007, 0.0075, 0.008, 0.0085, 0.009, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03, 0.05, 0.08, 0.2, 0.03, 0.04, 0.05, 0.07, 0.08, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 e 13 Gyr) e 4 metalicidades (0.0004, 0.01, 0.02 e 0.04% de metais em massa), totalizando 124 SSP's.

O *starlight* permite, ainda, adicionar componentes do contínuo para representar uma possível contribuição de poeira quente e uma lei de potência. Pelo fato de serem LINERs, considerou-se que não era necessário incluir estas componentes.

3.2.4 O código

O segundo passo para a síntese, após uma escolha adequada de uma base, é a escolha de um código que realize o processo do melhor ajuste do espectro em questão através da combinação de elementos da base. Um código que busque o melhor ajuste através da força bruta, não é eficiente,

já que encontrar o melhor ajuste com 133 elementos, para ~2500 pontos em cada um dos ~3450 espectros iria realizar $133! \times 2500 \times 3450 = 1.28 \times 10^{233}$ operações para cada cubo, o que iria demorar aproximadamente 4×10^{215} anos (considerando um computador de 4 núcleos de 2.5 GHz).

Para nossa síntese, utilizamos o código *starlight* (Fernandes et al. 2005), que realiza estas operações de maneira muito mais eficiente. Para o mesmo computador, encontrar a melhor solução levaria em média 13 dias para cada cubo. Nossas operações foram realizadas a partir de um servidor com 48 núcleos de 1.87GHz, cedido pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), dos quais foram utilizados apenas 40 núcleos, levando em torno de 2 dias por cubo. Este código ajusta um espectro observado com uma combinação em diferentes proporções de SSP's, usando apenas as que mais contribuem para a população total da galáxia, desconsiderando todas as que possuam uma contribuição muito baixa. Este código também procura pelo avermelhamento que melhor descreve o espectro observado, através de uma lei de extinção fornecida pelo usuário ou uma dentre várias já presentes no programa. A lei utilizada neste trabalho é uma variação da lei de Calzetti (Calzetti et al. 2000). Basicamente, o código *starlight* encontra o melhor modelo M_λ dado por

$$M_\lambda = M_{\lambda,0} \left[\sum_{j=1}^{N_\star} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \right] \otimes G(v_\star, \sigma_\star) \quad , \quad [\text{eq 3.8}]$$

onde $M_{\lambda,0}$ é o fluxo no ponto normalizado λ_0 , N_\star é o número de SSPs usados para compor o modelo, \vec{x} é o vetor de população, de modo que x_j indica a contribuição do j-ésimo espectro normalizado em λ_0 , $b_{j,\lambda}$ é o espectro do j-ésimo modelo, r_λ é o fator de avermelhamento $r_\lambda = 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$, e a convolução pela gaussiana $G(v, \sigma)$ leva em conta a dispersão e a velocidade de grupo estelar.

Este melhor modelo é encontrado através da minimização de χ^2 na equação

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [(O_\lambda - M_\lambda) w_\lambda]^2 \quad , \quad [\text{eq 3.9}]$$

onde O_λ é o espectro observado e w_λ é a máscara ponto a ponto, usada para mascarar linhas de emissão e pontos com defeitos no espectro, para os quais $w_\lambda=0$, além de poder ser utilizada para diminuir o peso de pontos com baixo S/N ou aumentar o peso de pontos com características importantes e determinantes dos espectros, como as bandas de CO.

Na Figura 3.5, é mostrado um espectro observado do núcleo da galáxia UGC 12914, assim como o espectro modelado para a mesma galáxia e o resíduo da subtração do observado pelo modelado. Na Figura 3.6 é mostrado o espectro modelado e os componentes usados para modelar o espectro.

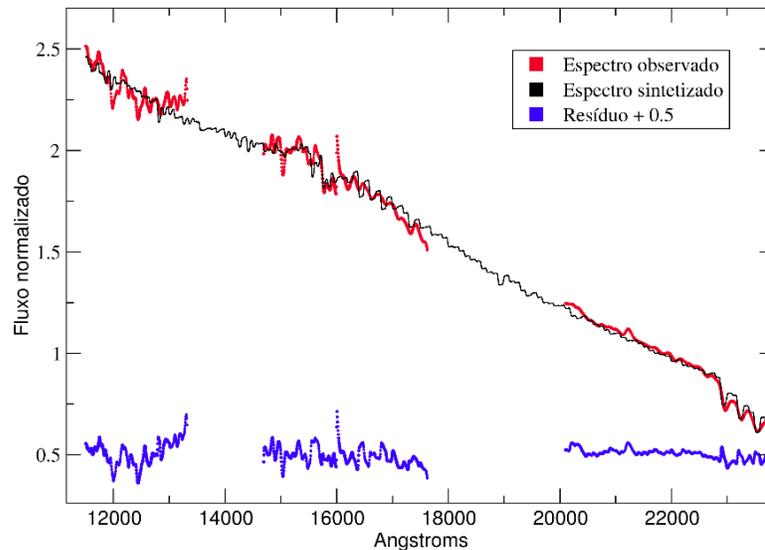


Figura 3.5 – Espectro observado, espectro modelado pelo *starlight* e resíduo para o núcleo da galáxia UGC 12914. O espectro observado é normalizado em 22000 Å.

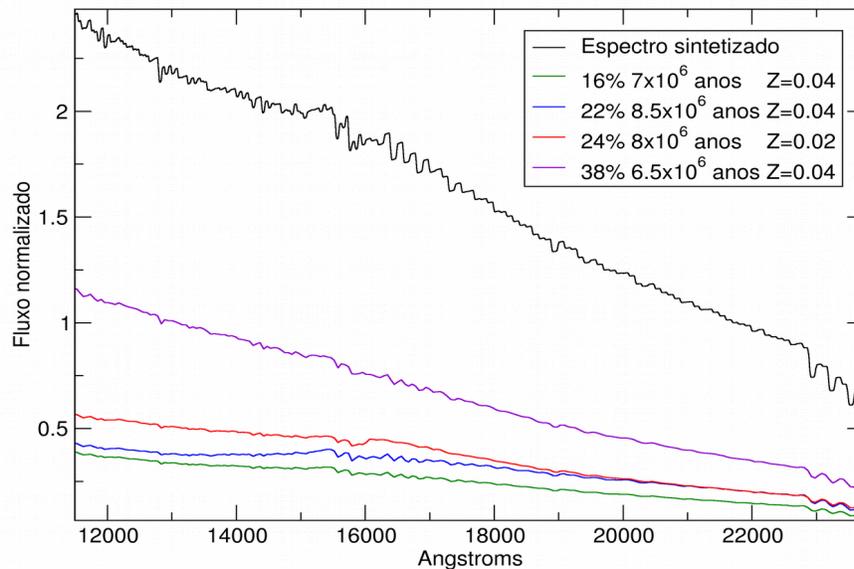


Figura 3.6 – Componentes do espectro sintetizado da Figura, com um A_v de 2.47. Para cada componente, são mostrados a porcentagem em fluxo, a idade e a metalicidade.

3.2.5 Apresentação dos resultados

Para evitar que populações com idades muito próximas fossem confundidas umas com as outras (Fernandes et al. 2005; Riffel, Rogério et al. 2009), ao apresentarmos nossos resultados, dividimos as SSP's em 3 classes:

- Jovem – Menos de 50 milhões de anos
- Intermediária – Entre 51 e milhões e 2 bilhões de anos
- Velha – Mais de 2.01 bilhões de anos

Também obtivemos valores para o avermelhamento, metalicidade média deduzida a partir da luminosidade e a partir da massa, idade média deduzida a partir da luminosidade e a partir da massa, além dos valores de χ^2 e A_{dev} , que medem a qualidade do ajuste. O valor de χ^2 é calculado

por $(O_\lambda - M_\lambda)^2$, enquanto que o valor de Adev é obtido por $|O_\lambda - M_\lambda|/O_\lambda$ em percentagem para todos os pontos de um espectro. Quanto menores estes valores, maior a qualidade do ajuste.

Para os espectros APO e dados ópticos, listamos os resultados da síntese por meio de Tabelas. Já para os dados NIFS, de posse dos valores retornados pela síntese em cada *spáxel*, construímos mapas para os mesmos dados obtidos para a amostra APO. A seguir, a nomenclatura utilizada para a apresentação dos valores das sínteses de população estelar.

- x_j , x_i e x_o são as contribuições percentuais em luminosidade das populações jovem, intermediária e velha, respectivamente.
- m_j , m_i e m_o são as contribuições percentuais em massa das mesmas populações.
- A_v é o avermelhamento.
- $Mage_L$ e $Mage_M$ são o logaritmo da idade média deduzida a partir da luminosidade e da massa, obtidos através das equações:

$$Mage_L = \sum_{j=1}^{N_s} x_j \log(t_j) \quad \text{e} \quad Mage_M = \sum_{j=1}^{N_s} m_j \log(t_j) \quad [\text{eq. 3.10}]$$

- MZ_L e MZ_M são a percentagem média de metais deduzida a partir da luminosidade e da massa, obtidas através das equações:

$$Z_L = \sum_{j=1}^{N_s} x_j Z_j \quad \text{e} \quad Z_M = \sum_{j=1}^{N_s} m_j Z_j \quad [\text{eq. 3.11}]$$

- SFR é a taxa de formação estelar em M_\odot/ano , calculada para os últimos 10^8 anos como (Dametto 2014):

$$SFR = \frac{[\sum_j M_{ini,j} \times M_*^{ini}]}{100 \cdot t} \quad [\text{eq. 3.12}]$$

Onde $M_{ini,j}$ é a contribuição em massa da j-ésima componente com idade menor que $t=10^8$ anos e M_*^{ini} é a massa total de estrelas processada pela galáxia, obtida através da equação:

$$M_*^{ini} = M_{ini,total} \times 4 \pi d^2 \times 3.826 \times 10^{-33} \quad [\text{eq. 3.13}]$$

Onde d é a distância em centímetros até a galáxia e $M_{ini,total}$ é um parâmetro de saída do *starlight*.

- F_{norm} é o fator de normalização em 22000 Å para o infravermelho e em 4020 Å para o óptico.
- A_{dev} e χ^2 são os valores que medem a qualidade do ajuste. Quanto menores estes valores, melhor o ajuste.

3.3 Cinemática estelar

As estrelas, em geral, participam da rotação galáctica, de modo que cada grupo de estrelas dentro de uma galáxia possui uma velocidade média estelar v , que, em geral, depende da distância em direção ao centro e do potencial gravitacional da galáxia.

Além da velocidade média, dentro de um grupo qualquer de estrelas, cada uma possui uma rotação e uma velocidade individual em relação à velocidade média. Estas características geram um alargamento σ nas bandas observadas, que são muito mais afetados pela dispersão de velocidades que pela rotação individual.

Para recuperarmos os dois valores mencionados para as estrelas na linha de visada, utilizamos a tarefa *ppxf* (disponível em <http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~mxc/software/#ppxf>), como descrita por Cappellari & Emsellem (2004). Esta tarefa procura pelo melhor ajuste espectral combinando espectros estelares a partir de uma biblioteca de modelos de estrelas que deve ser fornecida pelo usuário e, através da convolução com gaussianas, a fim de reproduzir suas características cinemáticas, encontra o espectro que possua o menor valor de χ^2 .

Utilizamos a biblioteca disponibilizada pela equipe do Gemini no endereço <http://www.gemini.edu/sciops/instruments/nearir-resources/spectral-templates>. Como o programa realiza o ajuste através das absorções estelares, utilizamos apenas as características com melhor S/N, que são as bandas de CO em 23000Å. Para obtermos melhores resultados, cortamos os espectros entre 22500 e 24000 Å, descartando alguns espectros que não possuíam sinal para toda a região, de modo que, ao final, a biblioteca estava composta por 57 espectros estelares. A biblioteca selecionada e cortada foi disponibilizada em <https://sites.google.com/site/luisgdh/astrophysics>, com o nome de *infraredlibrary*.

Na Figura 3.7, é mostrado um ajuste feito pelo *ppxf* utilizando esta mesma biblioteca, exatamente como retornado pelo programa, para um espectro ruidoso, próximo à borda, e para um espectro com um alto S/N, localizado no centro luminoso do objeto.

Aplicamos a tarefa para cada um dos espectros que compõem o cubo (uma média de 3500 espectros por cubo). Para executarmos esta tarefa interativamente para todo o cubo, desenvolvemos um script, chamado de *ppxfcube*, o qual disponibilizamos em <https://sites.google.com/site/luisgdh/astrophysics>, que aplica automaticamente o *ppxf* a todos os spáxeis, retornando, ao final, um mapa com a velocidade média e o desvio padrão em cada ponto.

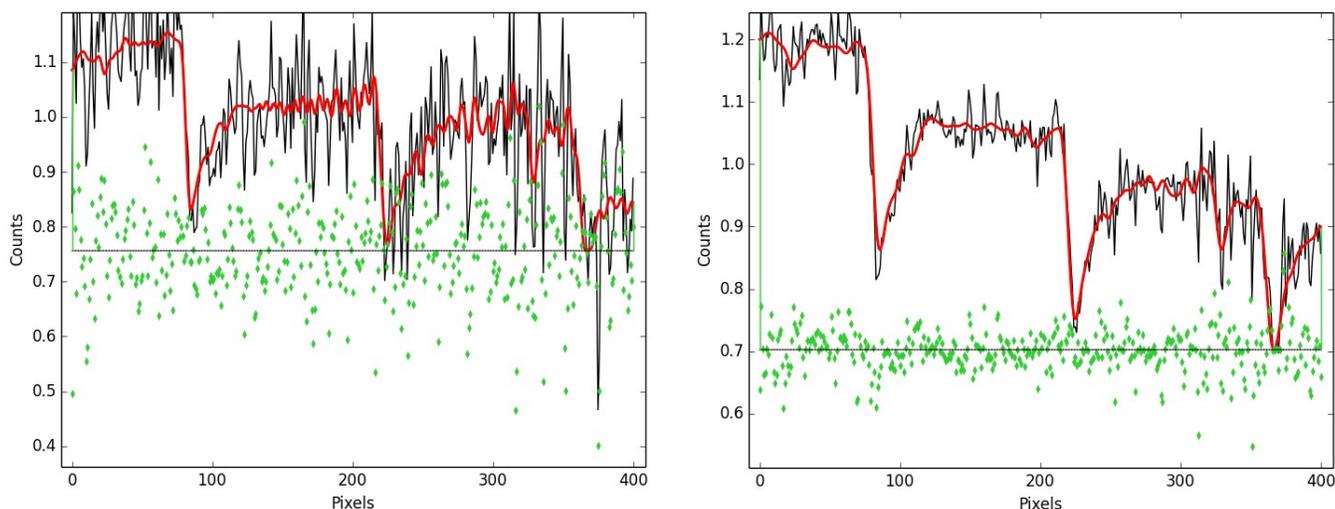


Figura 3.7 – Saída do programa *ppxf* para dois espectros normalizados. Em preto, dados observados da galáxia UGC 12914. Em vermelho, ajuste feito pelo programa e em verde, resíduo da subtração do espectro observado pelo espectro modelado. À esquerda, espectro ruidoso próximo à borda do cubo. À direita, espectro com alto S/N localizado no centro luminoso do cubo.

3.3.1 Modelos de rotação

Após o ajuste das linhas, os mapas de velocidade apresentaram claros padrões de rotação. Para procurar pela presença de *inflows* ou *outflows*, desenvolvemos um *script* que cria um modelo ideal de rotação para a LOSVD a partir dos dados observados, e a partir deste modelo realizamos a subtração da componente observada pela componente ideal.

Segundo Bertola et al. (1991), o movimento de um gás em uma galáxia pode ser aproximado para um modelo Kepleriano circular em um disco sujeito a um potencial central. A velocidade de rotação, neste caso, depende apenas do raio, e pode ser dada por

$$v_c(r) = \frac{Ar}{(r^2 + c_0^2)^{\frac{p}{2}}}, \quad [\text{eq 3.14}]$$

onde A é a amplitude das velocidade e c_0 e p são parâmetros ligados à extensão do “núcleo” da curva de rotação e r é a distância ao centro. Quando este plano se inclina em relação ao observador, a velocidade v de um ponto no disco é dada por

$$v(R, \Psi) = v_{\text{sys}} + \frac{AR \cos(\Psi - \Psi_0) \sin \theta \cos^p \theta}{(R^2 [\sin^2(\Psi - \Psi_0) + \cos^2 \theta \cos^2(\Psi - \Psi_0)] + c_0^2 \cos^2 \theta)^{\frac{p}{2}}}, \quad [\text{eq 3.15}]$$

onde R é a distância do ponto ao centro cinemático como vista do plano do céu, Ψ é o ângulo de posição deste ponto em relação ao ângulo de posição da linha dos nodos Ψ_0 , v_{sys} é a velocidade sistêmica da galáxia e θ é a inclinação do disco em relação ao plano do céu ($\pi/2$ radianos para a galáxia vista de perfil e 0 para a galáxia vista de frente).

Nos casos onde a cinemática do gás e das estrelas é dominado por movimentos circulares em um plano, a subtração das observações e o modelo ajustado deve deixar como resíduo o ruído intrínseco às medidas. Mostramos, na Figura 3.8, a curva de rotação observada, modelada e o resíduo da subtração para a linha de Bry da galáxia UGC 02982.

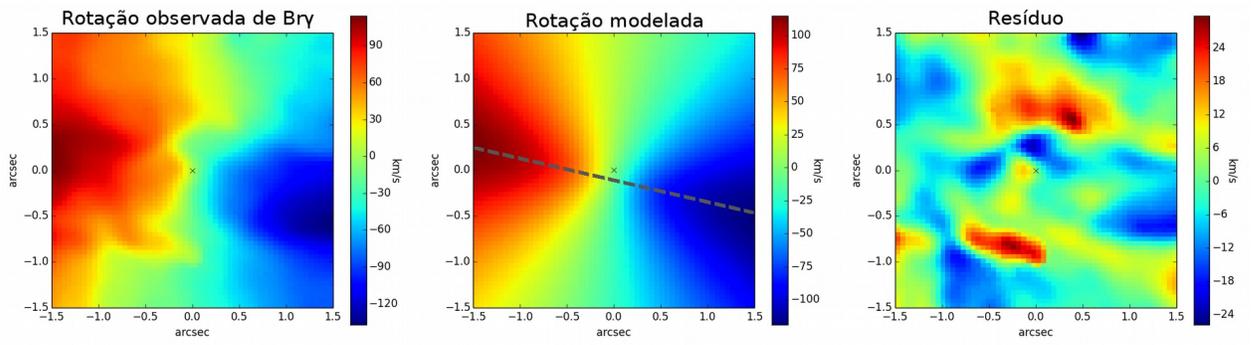


Figura 3.8– No painel esquerdo, curva de rotação observada para a linha de Bry da galáxia UGC 02982, através da qual foi ajustado o modelo ideal de rotação, mostrado no centro, com a linha dos nodos em cinza. À direita, resíduo da subtração.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO – AMOSTRA APO

4.1 Dados ópticos

Para os objetos da amostra APO que possuem espectros SDSS disponíveis, apresentamos nas Figuras 4.1 e 4.2 os espectros observados, o resultado da síntese de população estelar e o resíduo após subtrair da observação o template de população estelar. Em rosa, são mostrados os pontos mascarados ou clipados. Os resultados desta síntese são apresentados na Tabela 4.1.

Como estas galáxias foram retiradas da amostra CALIFA, alguns espectros já foram disponibilizados pelo levantamento. Por exemplo, González-Delgado et al. (2014) realizaram síntese de população estelar para 107 galáxias, 5 das quais pertencem à nossa amostra. Os únicos resultados apresentados foram os valores de idade média deduzida a partir da luminosidade (M_{age_L}). Estes valores são apresentados na Tabela 4.2 para as galáxias comuns.

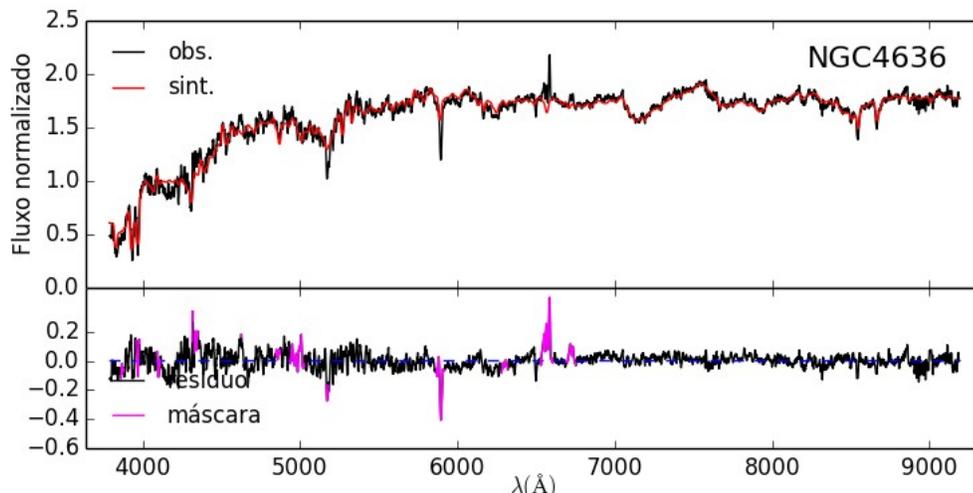


Figura 4.1 – Espectro observado, modelado, ruído e máscara da síntese para a NGC 4636.

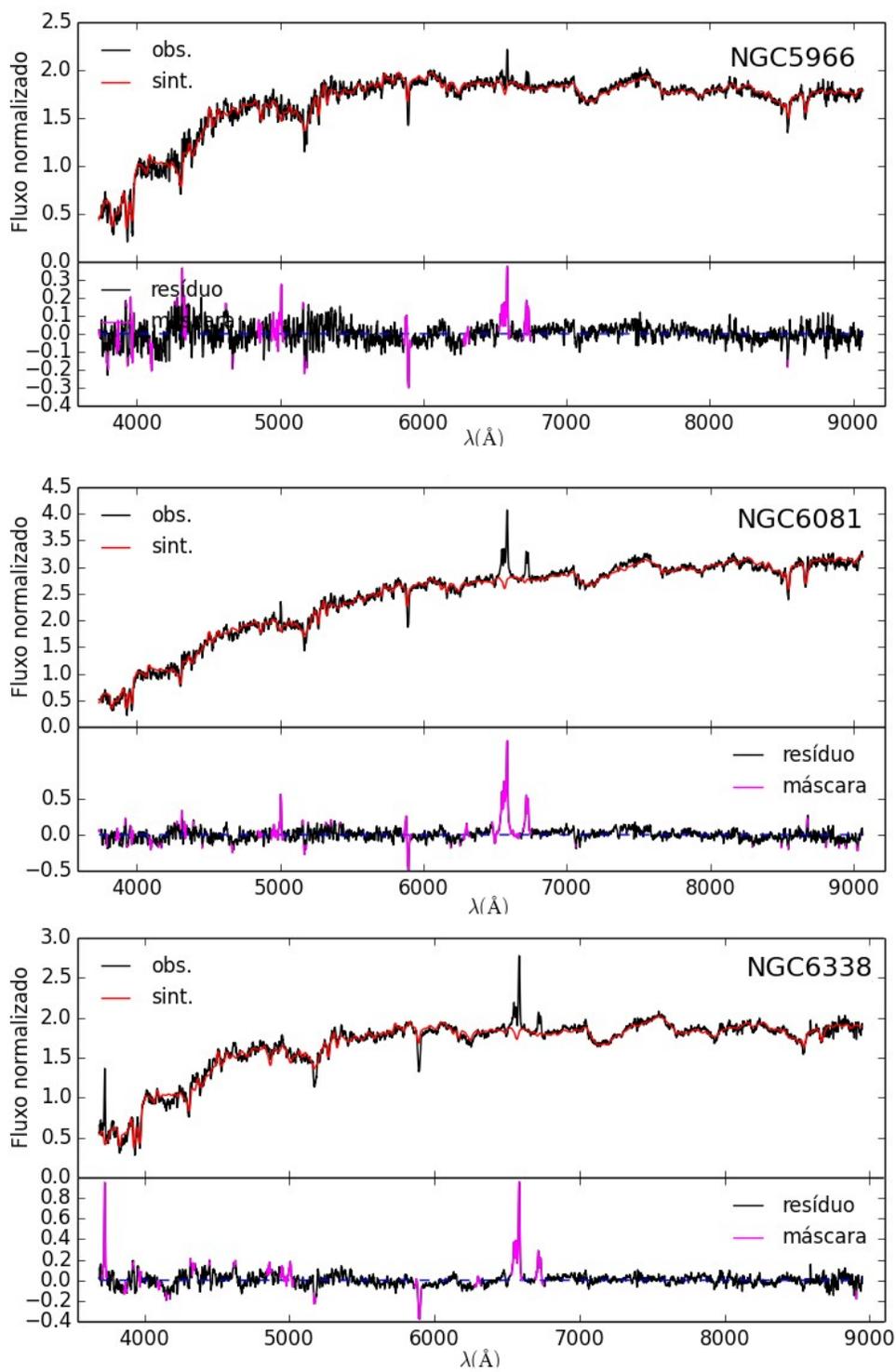


Figura 4.2 – Igual à Figura 4.1 para a NGC 5966 (painel superior), NGC 6081 (painel central) e NGC 6338 (painel inferior).

Tabela 4.1a – Percentagem de população jovem, intermediária e velha e valores de avermelhamento para espectros ópticos da amostra APO.

Objeto	xy	xi	xo	my	mi	mo	Av
NGC4636	0.00	40.54	59.46	0.00	5.09	94.91	0.33
NGC5966	0.00	8.03	91.97	0.00	0.95	99.05	0.28
NGC6081	0.00	1.58	98.42	0.00	0.36	99.64	1.01
NGC6338	0.00	42.81	57.09	0.00	5.75	94.25	0.39

Tabela 4.1b – Valores de idade média, metalicidade, SFR, fator de normalização e qualidade do ajuste para espectros ópticos da amostra APO.

Objeto	Mage_L	Mage_M	MZ_L	MZ_M	SFR (M_{\odot}/ano)	F_Norm	Adev	χ^2
NGC4636	9.61	10.05	0.0243	0.0206	0.00E+00	2.19E-15	2.80	0.73
NGC5966	9.87	10.04	0.01746	0.01605	0.00E+00	1.32E-15	2.63	0.79
NGC6081	10.07	10.10	0.0122	0.01525	0.00E+00	7.83E-16	2.62	1.39
NGC6338	9.58	10.04	0.02494	0.01849	0.00E+00	1.11E-15	2.59	0.81

Tabela 4.2 – Valores de idade média deduzida a partir da luminosidade retirados de González-Delgado et al. (2014).

Objeto	Mage_L
NGC 5966	9.82
NGC 6081	9.83
NGC 6146	9.83
NGC 6338	9.92
UGC 08234	9.37

Comparando os valores de Mage_L obtidos através da nossa síntese com aqueles obtidos por González-Delgado et al. (2014), verificamos uma concordância maior que 96% para as três galáxias em comum, confirmando que o resultado obtido dos espectros SDSS é robusto e pode ser utilizado como referência para a síntese no NIR.

A partir dos espectros com a população estelar subtraída, medimos os valores das linhas de $H\alpha$, $H\beta$, $[\text{NII}]\lambda 6583 \text{ \AA}$ e $[\text{OIII}]\lambda 5007 \text{ \AA}$. Plotamos as razões de linhas destas galáxias sobre o diagrama BPT publicado por Bamford et al. (2008). Os resultados são apresentados na Figura 4.3.

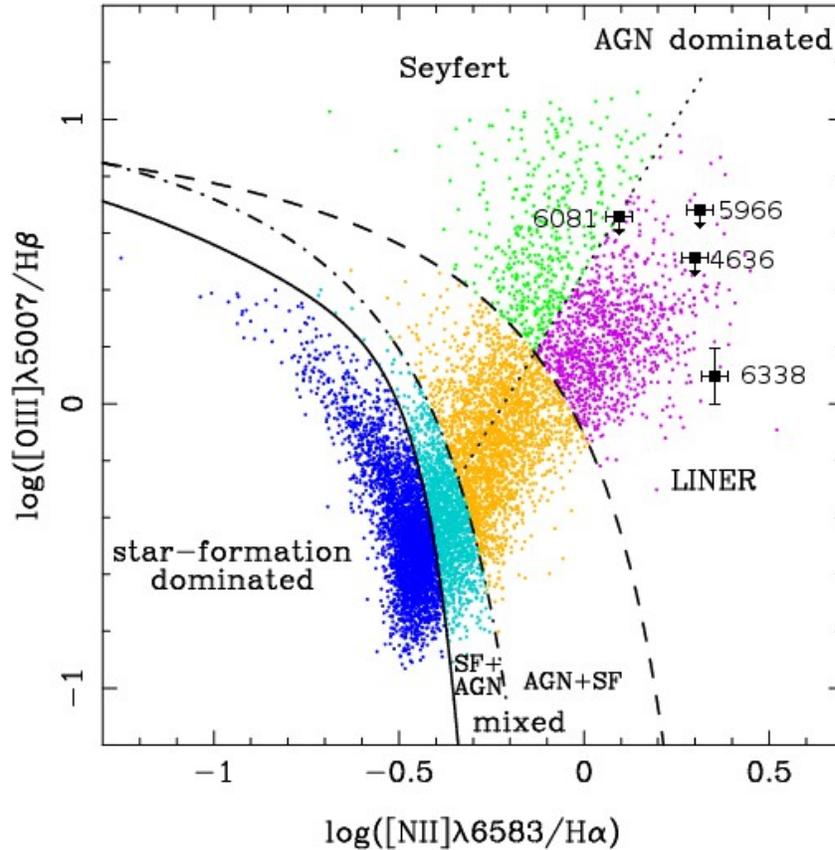


Figura 4.3 – Diagrama BPT retirado de Bamford et al. (2008) com as 4 galáxias sobrepostas (quadrados cheios em preto). O número do catálogo NGC encontra-se ao lado de cada ponto. De acordo com a localização dos pontos no diagrama, confirmamos a classificação de núcleo LINER.

Tabela 4.3 – Taxa de formação estelar em M_{\odot}/ano deduzida a partir das linhas de $H\alpha$ e valores de fluxo das linhas de $H\alpha$, $H\beta$, $[\text{NII}]\lambda 6583 \text{ \AA}$ e $[\text{OIII}]\lambda 5007 \text{ \AA}$.

Objeto	SFR(M_{\odot}/ano)	$H\alpha$	$H\beta$	$[\text{NII}]$	$[\text{OIII}]$
NGC4636	0.00118	7.06×10^{-15}	$< 1.0 \times 10^{-15}$	1.07×10^{-14}	2.95×10^{-15}
NGC5966	0.0123	2.25×10^{-15}	$< 3.9 \times 10^{-16}$	4.85×10^{-15}	2.70×10^{-15}
NGC6081	0.0949	8.49×10^{-15}	$< 2.5 \times 10^{-16}$	1.26×10^{-14}	3.46×10^{-15}
NGC6338	0.1078	6.22×10^{-15}	5.09×10^{-16}	1.32×10^{-14}	1.45×10^{-15}

Na literatura, das 8 galáxias desta amostra, apenas a NGC 4636, NGC 5966 e a UGC 10695 possuíam confirmação prévia como LINERs. A NGC 5905 é classificada como uma galáxia HII e as demais não possuíam classificação. Através do diagrama da Figura 4.2, confirmamos a natureza LINER de NGC 4636, NGC 5966, NGC 6081 e NGC 6338.

Sendo assim, nossa amostra APO é composta por 5 LINERs, 1 galáxia HII e duas com dados insuficientes para uma melhor classificação.

Para o cálculo da taxa de formação estelar, corrigimos os espectros por avermelhamento medido a partir da razão das linhas de $H\beta/H\alpha$ e medimos as linhas de $H\alpha$, aplicando a relação da equação 3.7. Estes valores são apresentados na Tabela 4.3. Na mesma tabela, são também apresentados os valores dos fluxos de $H\alpha$, $H\beta$, $[NII]\lambda 6583 \text{ \AA}$ e $[OIII]\lambda 5007 \text{ \AA}$.

A taxa de formação estelar é também derivada pelo *starlight* com base na população jovem. Como o programa não encontrou esta população em sua síntese, a taxa calculada foi de $0 M_{\odot}/\text{ano}$, valor dentro do erro esperado, dados os baixos valores encontrados através da linha de $H\alpha$. Estes resultados são consistentes com valores esperados para galáxias elípticas, com taxas de formação estelar típicas em torno de $0.1 M_{\odot}/\text{ano}$ (Tan & Blackman 2005), muito inferiores à taxa de formação estelar da Via Láctea, com um valor entre 0.68 e $1.45 M_{\odot}/\text{ano}$ (Robitaille & Whitney 2010).

4.2 Dados infravermelhos

Nos dados infravermelhos da amostra do APO, com exceção da NGC 5905, não foram encontradas linhas de emissão. Sendo assim, para os dados infravermelhos da amostra, os resultados apresentados e a discussão se resumem à síntese de população estelar. Nas Figuras 4.4 e 4.5, em preto são mostrados os espectros obtidos para as 8 galáxias, juntamente com os espectros modelados pela síntese em vermelho. Em azul, é mostrado o resíduo escalonado, resultado da subtração do espectro observado pelo espectro modelado. Já na Tabela 4.4, são apresentados os resultados da síntese, obtidos com o *starlight*.

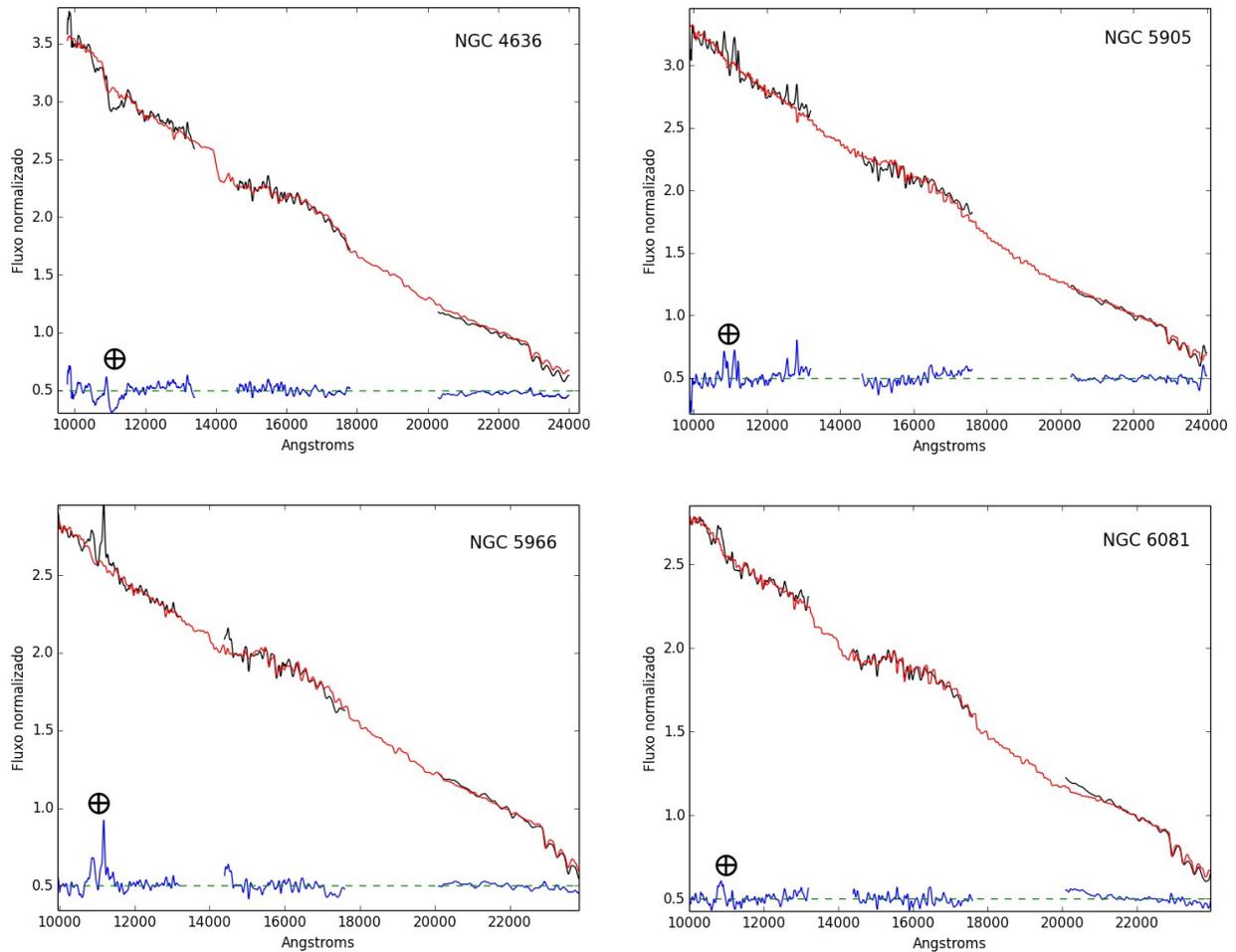


Figura 4.4 – Espectro observado (preto), modelado pelo *starlight* (vermelho) e resíduo (azul) para a NGC 4636 (painel superior esquerdo), NGC 5905 (superior direito), NGC 5966 (inferior esquerdo) e NGC 6081 (inferior direito). O símbolo \oplus indica um resíduo deixado após a remoção das bandas telúricas mascarado durante a síntese. As informações do resultado da síntese são apresentadas na Tabela 4.3.

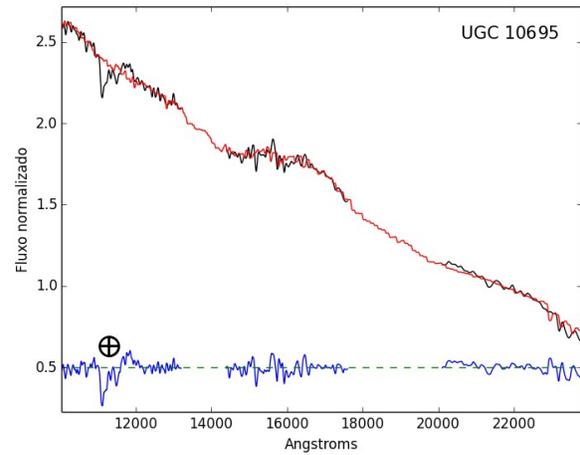
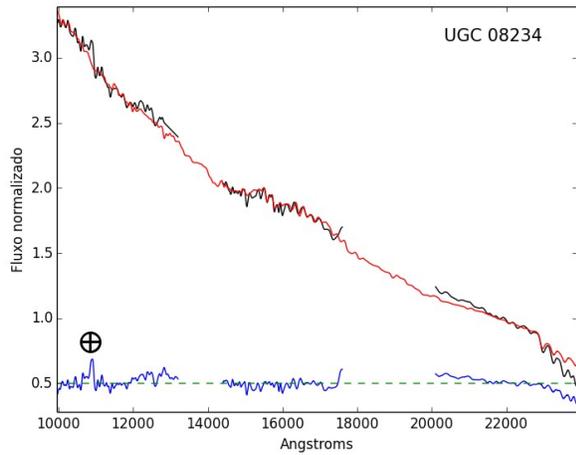
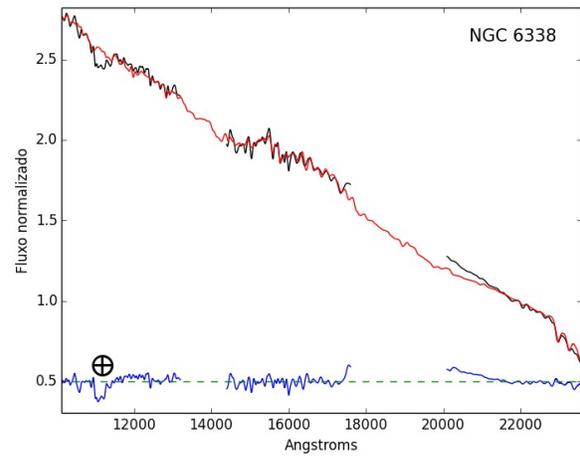
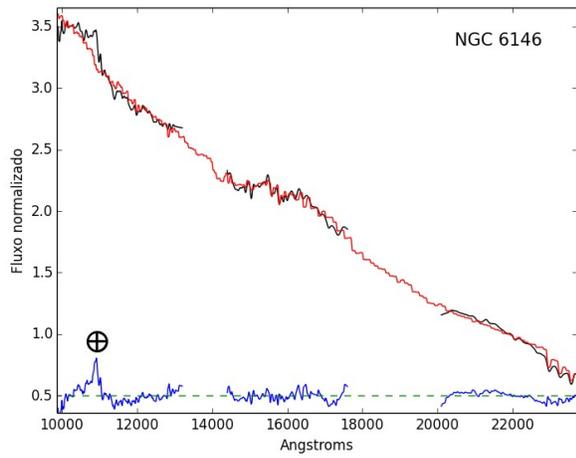


Figura 4.5 – Igual à Figura 4.4 para a NGC 6146 (painel superior esquerdo), NGC 6338 (superior direito), UGC 08234 (inferior esquerdo) e UGC 10695 (inferior direito).

Tabela 4.4a – Percentagem de população jovem, intermediária e velha e valores de avermelhamento para espectros infravermelhos da amostra APO.

Objeto	xy	xi	xo	my	mi	mo	Av
NGC4636	23.51	39.50	36.99	1.04	18.48	80.48	1.27
NGC5905	73.12	26.88	0.00	39.80	60.20	0.00	2.06
NGC5966	75.03	24.97	0.00	25.05	74.95	0.00	1.91
NGC6081	50.00	48.25	1.75	5.85	85.66	8.49	1.54
NGC6146	29.98	37.08	32.94	2.27	12.46	85.27	0.95
NGC6338	61.40	38.6	0.00	16.97	83.03	0.00	2.06
UGC08234	61.07	38.93	0.00	8.72	91.28	0.00	0.98
UGC10695	38.75	34.31	26.94	0.72	16.30	82.98	1.45

Tabela 4.4b – Valores de idade média, metalicidade, SFR, fator de normalização e qualidade do ajuste para espectros infravermelhos da amostra APO.

Objeto	Mage_L	Mage_M	MZ_L	MZ_M	SFR (M_{\odot} /ano)	F_Norm	Adev	χ^2
NGC4636	8.63	9.44	0.01388	0.01449	3.75E-01	9.10E-15	2.63	1.98
NGC5905	7.43	7.99	0.01558	0.01509	3.73E+00	7.04E-16	2.08	2.17
NGC5966	7.32	8.16	0.02935	0.02137	3.23E+00	1.12E-15	1.79	2.02
NGC6081	8.08	9.05	0.03561	0.03909	1.82E+00	7.53E-16	2.14	2.09
NGC6146	8.89	9.93	0.02193	0.01336	6.06E+00	4.44E-16	2.33	2.31
NGC6338	7.63	8.56	0.03912	0.03939	9.51E+00	8.95E-16	2.28	2.40
UGC08234	7.90	9.03	0.03842	0.03898	1.19E+01	1.64E-15	2.02	2.23
UGC10695	8.92	9.93	0.02719	0.02625	1.02E+00	6.46E-16	2.44	2.44

Para as galáxias com dados do SDSS disponíveis, verificou-se uma discrepância muito grande entre o resultado da síntese óptica e infravermelha em todos os valores. A população encontrada no infravermelho foi predominantemente jovem, população esta que não foi

encontrada no óptico. Os valores de idade média deduzida através da luminosidade e os valores de taxa de formação estelar chegaram a duas ordens de grandeza de diferença em relação à síntese óptica.

Este resultado poderia ser entendido em termos físicos nos casos de galáxias espirais, pois com sua heterogeneidade populacional, seria possível o óptico estar dominado por uma casca de população velha, abrigando em seu núcleo uma população jovem extremamente avermelhada e observável apenas no infravermelho. No entanto, em galáxias elípticas esta diferença não é esperada e carece de interpretação física, pois são as galáxias com a população estelar mais homogênea possível.

Esta discrepância sugere uma falha no método de síntese de população estelar, já que o método em si é, por construção, degenerado. Esta degenerescência se intensifica no infravermelho, onde a forma do contínuo pode ser mantida aumentando a população jovem mas compensando com um aumento no avermelhamento.

Outro motivo que pode explicar esta diferença é a qualidade dos modelos no infravermelho. Os modelos utilizados neste trabalho possuem uma binagem no óptico de 20 Å, correspondendo a uma resolução mínima de 200 km/s e que pode chegar a 400 km/s em 8000Å. No infravermelho, no entanto, os modelos possuem uma binagem de 50 Å até 16000 Å e de 100 Å nos demais comprimentos de onda, com uma resolução mínima de 160 km/s e máxima de 320 km/s, o que não é suficiente para distinguir muitas das características espectrais presentes no infravermelho.

Apesar da limitação do método e as potenciais falhas, o resultado de modo geral é consistente. Por exemplo, a galáxia com a maior população jovem foi a galáxia classificada como HII, com aproximadamente 40% de população jovem em massa, e todas as elípticas possuindo uma população jovem próxima ou inferior a 25%.

Para as galáxias da amostra APO com dados ópticos, aplicamos novamente a síntese no NIR, desta vez fixando os valores de avermelhamento na síntese no óptico. Os ajustes feitos pelo *starlight* são mostrados na Figura 4.6 e os valores são mostrados na Tabela 4.5.

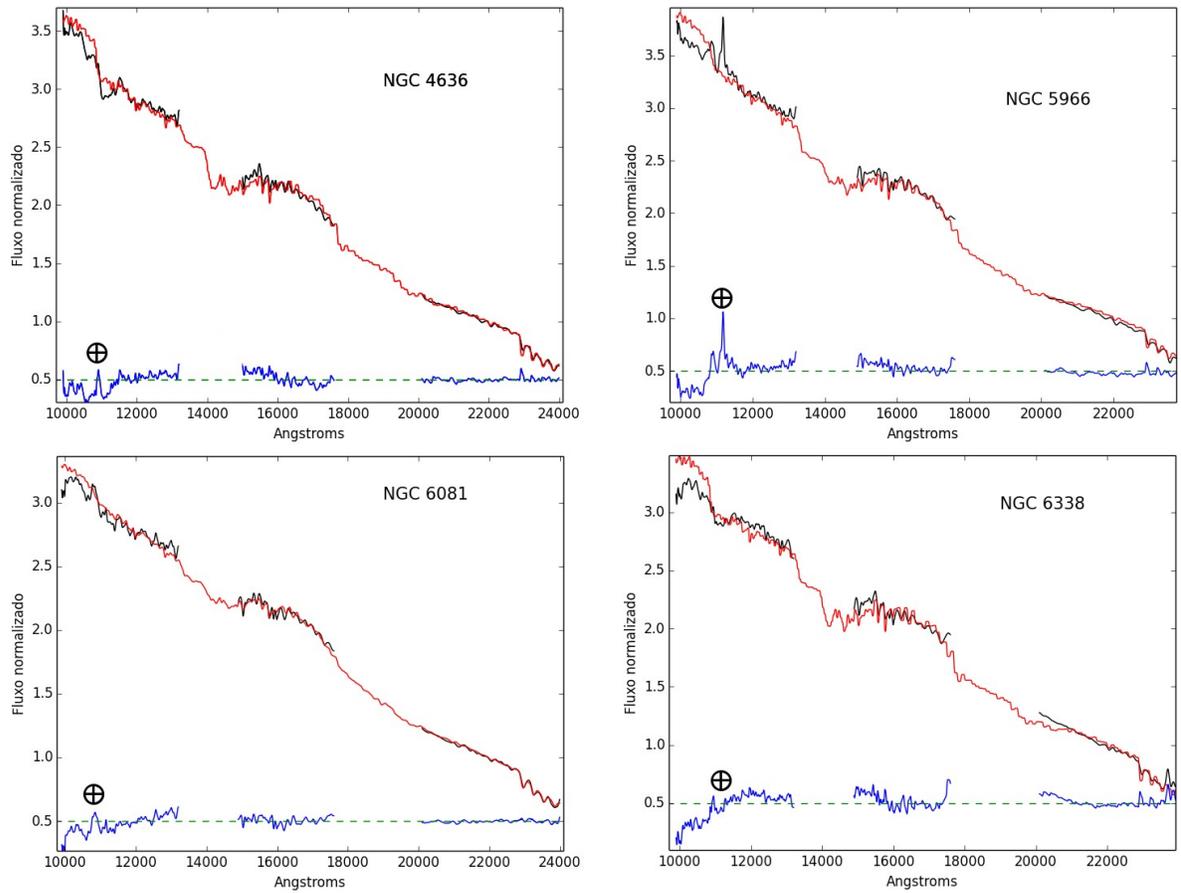


Figura 4.6 – Ajustes do *starlight* com A_v fixo para as galáxias APO com dados SDSS.

Tabela 4.5a – Percentagem de população jovem, intermediária e velha para valores fixos de avermelhamento para espectros infravermelhos da amostra APO.

Objeto	xy	xi	xo	my	mi	mo	Av
NGC 4636	0.00	66.00	34.00	0.00	15.06	84.94	0.33
NGC 5966	0.96	60.74	38.30	0.01	11.63	88.36	0.28
NGC 6081	0.00	30.96	69.04	0.00	4.59	95.41	1.01
NGC 6338	2.61	91.38	4.01	0.28	84.18	15.54	0.39

Tabela 4.5b - Valores de idade média, metalicidade, SFR, fator de normalização e qualidade do ajuste para espectros ópticos da amostra APO.

Objeto	Mage_L	Mage_M	MZ_L	MZ_M	SFR (M_{\odot} /ano)	F_Norm	Adev	χ^2
NGC 4636	9.35	9.94	0.02903	0.02473	0.00E+00	9.10E-15	0.70	2.32
NGC 5966	9.25	9.96	0.03229	0.02233	1.96E-02	9.37E-16	1.03	2.56
NGC 6081	9.60	9.98	0.02787	0.02256	0.00E+00	7.52E-16	0.63	2.22
NGC 6338	8.91	9.05	0.03711	0.03406	2.91E-01	7.58E-16	0.68	2.60

Os ajustes realizados foram, em geral, melhores que os resultados com o Av livre. Isto pode ser constatado através do parâmetro Adev menor para a síntese com Av fixo, demonstrando a degenerescência do método. As soluções encontradas para a síntese com o Av livre pertencem a um mínimo local, mas ao limitar a quantidade de parâmetros livres, o programa é forçado a encontrar uma solução global para o Av especificado.

A população estelar encontrada no NIR também ficou mais próxima daquela derivada pela síntese no óptico, embora com uma população predominantemente intermediária, em comparação com uma população predominantemente velha encontrada no óptico, o que reflete a maior sensibilidade à estas populações no NIR. Não foi encontrada população jovem significativa, o que concorda com a análise do espectro óptico, assim como os valores de idade média deduzida através da luminosidade, se aproximando muito dos mesmos valores para a síntese óptica deste trabalho e do trabalho de González-Delgado et al. (2014). Pelo fato de a população jovem encontrada ter sido nula para a NGC 4636 e NGC 6081, a taxa de formação estelar encontrada foi

também nula, tendo se aproximado dos valores deduzidos a partir da linha de H α nos demais casos, com um fator 1.6 para a NGC 5966 e 2.71 para a NGC 6338.

Estes resultados também concordam com os obtidos no infravermelho por Kotilainen et al. (2012), que encontraram que a presença de estrelas jovens em galáxias elípticas é praticamente desprezível, sendo dominadas por estrelas vermelhas evoluídas, o que, em nossa síntese, se torna mais claro no óptico, sendo também visto nas porcentagens em massa no infravermelho.

Para a NGC 6338, a ausência de linhas de CO nítidas (ver Figura 4.6), levou a uma população intermediária superior às populações das demais galáxias. As bandas de CO são elementos cruciais para o ajuste das populações estelares no infravermelho, de modo que seu resultado é ambíguo, devido ao seu baixo S/N em uma região crucial.

A galáxia com a menor população intermediária no NIR é composta por 31.22% de população intermediária em luminosidade, e as demais possuem, todas, mais de 62% de população intermediária, o que é suficiente para ionizar o gás, produzindo assim as linhas em emissão do tipo LINER encontradas, embora mecanismos adicionais não possam ser descartados.

Os resultados descritos neste capítulo demonstram que a síntese no infravermelho é confiável desde que uma informação prévia a respeito do avermelhamento esteja disponível. Quando esta informação não pode ser fixada, a síntese tende a superestimar tanto a população jovem quanto o avermelhamento. Estas hipóteses, no entanto, serão testadas para os dados da amostra NIFS.

Para as galáxias sem dados de avermelhamento, os resultados para a síntese são menos confiáveis, embora demonstrem a tendência de existirem populações mais jovens em galáxias HII do que em galáxias elípticas, confirmando os resultados encontrados na literatura. Estes resultados também descartam estrelas jovens como mecanismos de ionização em galáxias LINER elípticas.

No entanto, todos os resultados obtidos no infravermelho podem ser gerados pela baixa qualidade dos modelos, além de estarem limitados pela degenerescência intrínseca ao método de síntese de população estelar. Deste modo, estudos adicionais são necessários para confirmar os resultados encontrados

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO – AMOSTRA NIFS

5.1 Síntese óptica e diagramas de diagnóstico

Os espectros observados e modelados pela síntese para os dados ópticos da UGC 00556 e UGC 02982 são apresentados nos dois painéis da Figura 5.1. Cada painel está subdividido em dois quadros. No superior é indicado, em preto, o espectro observado e, em vermelho, o resultado da síntese. No quadro inferior mostra-se em preto a componente nebular após a subtração do contínuo estelar. Os pontos mascarados na síntese são mostrados em rosa. Já os resultados da síntese são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1a – Percentagem de população jovem, intermediária e velha e valores de avermelhamento para espectros ópticos da amostra NIFS.

Objeto	xy	xi	xo	my	mi	mo	Av
UGC00556	52.90	42.60	4.50	1.96	19.24	78.80	2.70
UGC02982	90.56	0.04	9.40	0.73	0.00	99.27	3.49

Tabela 5.1b – Valores de idade média, metalicidade, SFR, fator de normalização e qualidade do ajuste para espectros ópticos para a amostra NIFS.

Objeto	Mage_L	Mage_M	MZ_L	MZ_M	SFR (M_{\odot} /ano)	F_Norm	Adev	χ^2
UGC00556	7.64	9.60	0.02288	0.03657	1.33E+00	4.76E-16	2.67	0.34
UGC02982	6.97	9.98	0.005471	0.04724	2.88E+01	2.63E-16	6.60	0.25

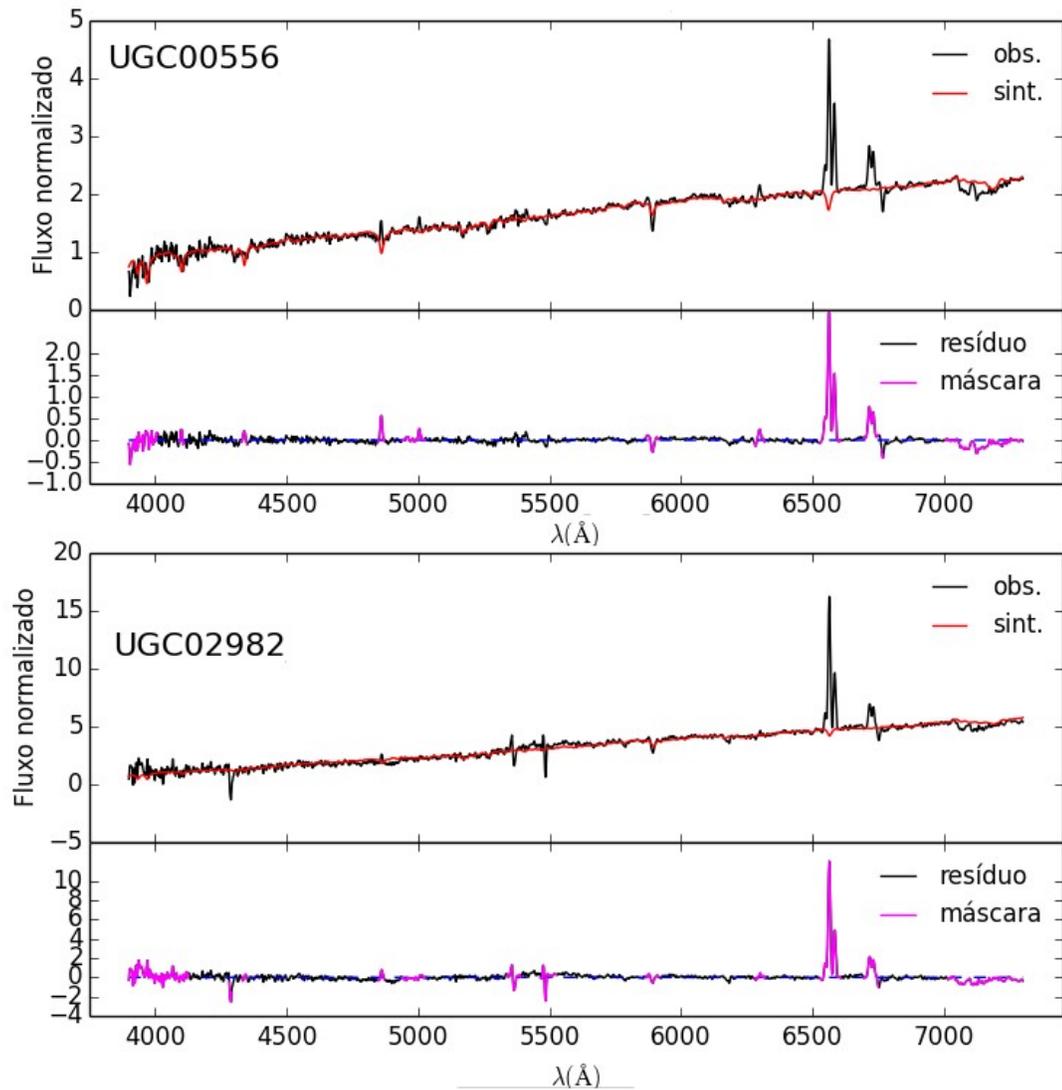


Figura 5.1 – Acima, espectro óptico observado e sintetizado, para a UGC 00556. Abaixo, o mesmo para a UGC 02982.

Após a síntese, subtraímos a população estelar e realizamos medidas de fluxo nas linhas de $H\alpha$, $H\beta$, $[NII] \lambda 6583 \text{ \AA}$ e $[OIII] \lambda 5007 \text{ \AA}$, as quais foram plotadas sobre o diagrama BPT e mostradas na Figura 5.2. As galáxias da amostra APO com dados ópticos são mostradas em azul para comparação, e as duas galáxias NIFS são mostradas em preto. Na Tabela 5.2, mostramos os

valores das linhas de $H\alpha$, $H\beta$, $[NII] \lambda 6583 \text{ \AA}$ e $[OIII] \lambda 5007 \text{ \AA}$ e a taxa de formação estelar deduzida a partir da linha de $H\alpha$.

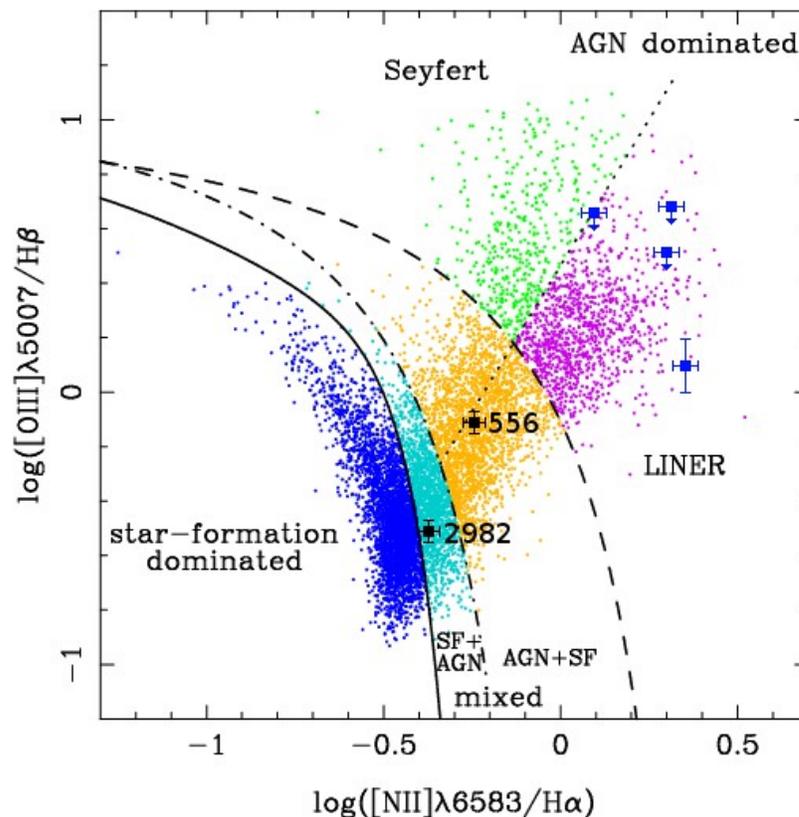


Figura 5.2 – Diagrama BPT retirado de Bamford et al. (2008). As galáxias APO aparecem em azul e as duas galáxias NIFS com dados ópticos estão em preto, com o número do catálogo NGC ao lado de cada ponto.

Tabela 5.2 – Taxa de formação estelar em M_{\odot} /ano deduzida a partir das linhas de $H\alpha$ e valores de fluxo das linhas de $H\alpha$, $H\beta$, $[NII] \lambda 6583 \text{ \AA}$ e $[OIII] \lambda 5007 \text{ \AA}$.

Objeto	SFR(M_{\odot} /ano)	$H\alpha$	$H\beta$	$[NII]$	$[OIII]$
UGC00556	0.00118	1.62×10^{-14}	2.46×10^{-15}	8.35×10^{-15}	1.14×10^{-15}
UGC02982	0.0123	3.42×10^{-14}	2.82×10^{-15}	1.38×10^{-14}	3.86×10^{-16}

Através deste diagrama, confirmamos a natureza LINER dominante da UGC 00556, com um indicativo de uma formação estelar em andamento, assim como a natureza SFG da UGC 02982, no limite entre uma formação estelar pura e a presença de um núcleo ativo de baixa luminosidade. A natureza SFG da UGC 02982 ficou evidente a partir da síntese de população estelar no óptico, tendo encontrado uma contribuição de população jovem, em luminosidade, próxima a 95%, e uma idade média menor que 10^7 anos.

As galáxias NIFS se diferenciam das galáxias APO pela morfologia e pela luminosidade infravermelha, o que pode ser entendido através do diagrama como sendo causado pela formação estelar intensa presente nas primeiras, de modo que sua ionização aparenta ser preferencialmente causada por *starbursts*, em comparação com uma ionização com estrelas pAGB ou acreção de matéria por um buraco negro sub-Eddington nas galáxias ETGs. Como as galáxias da amostra NIFS situam-se na região de objetos em transição, mecanismos adicionais não podem ser descartados.

Para o diagrama de diagnóstico no infravermelho, usamos como referência o diagrama publicado por Colina et al. (2015). No painel superior esquerdo da Figura 5.3, são mostradas as posições para regiões integradas a partir dos cubos de dados. A primeira região corresponde a uma abertura circular com 0.35" de diâmetro centrada no pico máximo do contínuo (marcadas nas Figuras 2.2 a 2.4) e uma segunda região com todo o cubo colapsado. Para a UGC 02982, também é apresentada uma região de 0.35" centrada no pico em emissão de Br γ . Isto porque, para este objeto, o máximo na emissão de Br γ não é coincidente com o máximo do contínuo. Nos demais painéis, apresentamos as nuvens dos pontos individuais para as três galáxias em diagramas separados, indicadas com as mesmas cores do diagrama com as regiões integradas

No diagrama da Figura 5.3, não está indicada uma região de objetos em transição, como ocorre com o diagrama da Figura 5.2. A posição dos pontos da UGC 00556 a colocam na fronteira entre uma galáxia com intensa formação de estrelas, com uma quantidade maior de pontos dentro da classe de AGN. Já a UGC 02982 localiza-se preferencialmente na região de formação estelar, com o seu núcleo mais próximo de valores de um AGN. A distribuição de pontos para este objeto confirma a sua classificação no diagrama da Figura 5.2 como objeto em transição, o que é visto como um indicativo de que possa haver mais de um mecanismo

produzindo as linhas em emissão, embora seja dominada por um componente *starburst*. A UGC 12914 situa-se inteiramente na região de AGNs, confirmando sua natureza LINER.

Nas seções seguintes, descreveremos individualmente os resultados obtidos para cada cubo de dados no que se refere à emissão das linhas, cinemática do gás e estelar e população estelar.

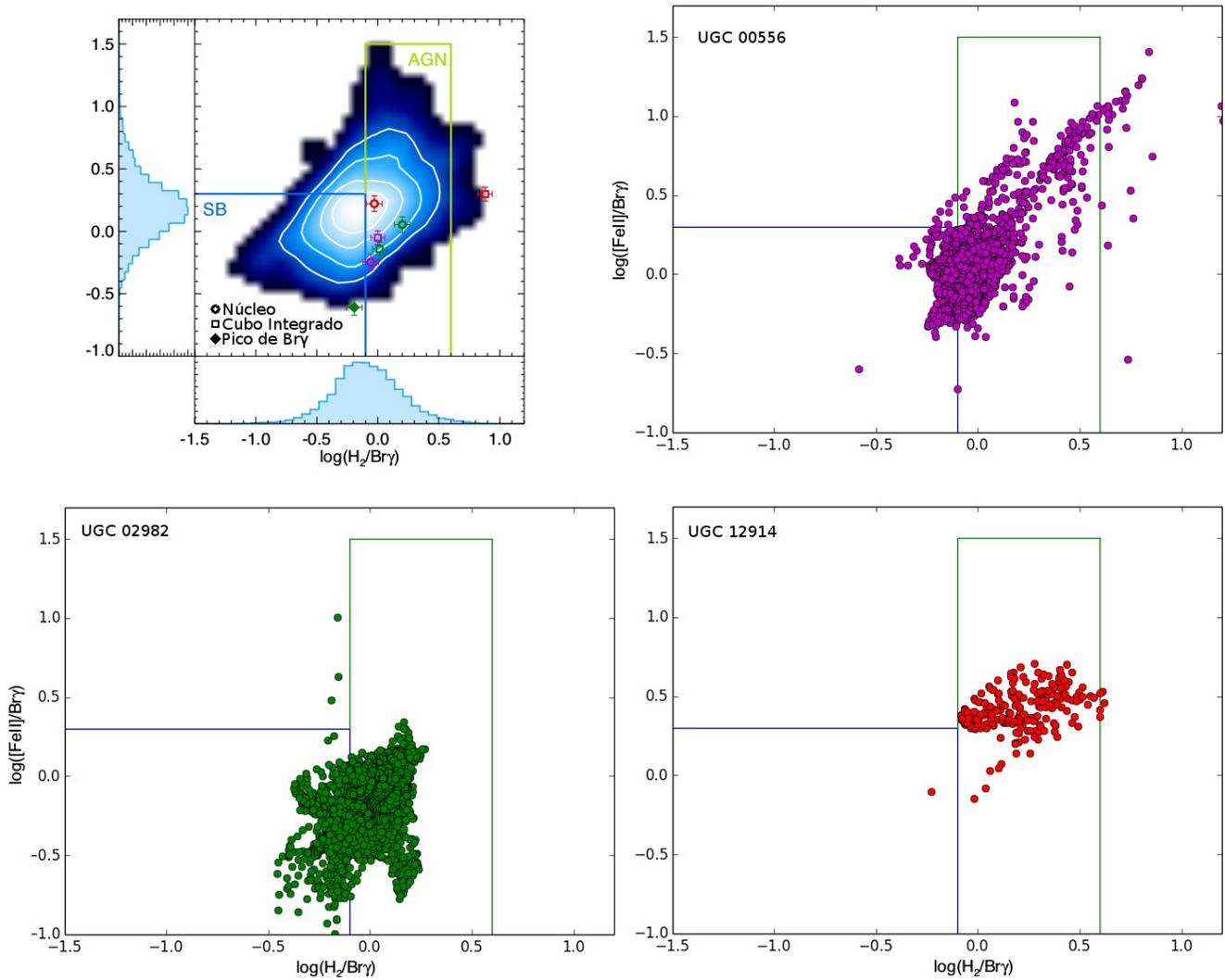


Figura 5.3 – No painel superior esquerdo, regiões integradas sobrepostas ao diagrama de diagnóstico retirado de Colina et al. (2015). Nos demais painéis, posição dos pontos individuais.

5.2 UGC 00556

Na Figura 5.4, são apresentados os mapas de distribuição de fluxo para as linhas de [FeII] $\lambda 16440$ Å, HeI $\lambda 20588$ Å, H₂ $\lambda 21212$ Å e Br γ $\lambda 21660$ Å da galáxia UGC 00556. Sobre o mapa da linha de H₂, mostramos os contornos do contínuo integrado das bandas JHK. Na Figura 5.5, são mostrados os mapas de razões das linhas de H₂ $\lambda 21212$ Å/Br γ e [FeII] $\lambda 16440$ Å/Br γ , o mapa de avermelhamento deduzido a partir da razão de Pa β /Br γ e o mapa da taxa de formação estelar deduzida a partir do fluxo da linha de Br γ corrigida por A_v em unidades de M_{\odot}/ano .

As linhas de H₂ e Br γ encontram-se distribuídas uniformemente, com um pico em sua emissão ao longo do eixo maior da galáxia e um baixo S/N ao norte do campo de visão do cubo. A linha de HeI, com um S/N mais baixo, sugere uma distribuição semelhante. Estes resultados sugerem que elas são ionizadas por um mesmo mecanismo, muito provavelmente por formação estelar. Já a linha de [FeII] possui picos distribuídos ao longo do campo de visão do IFU, desacoplados da distribuição de fluxo das demais linhas, o que pode indicar a presença de mecanismos de ionização adicionais para o [FeII].

A razão de H₂/Br γ apresenta pouca variação ao longo do cubo, com a maioria das regiões apresentando valores próximos de 0.8. As flutuações observadas são possivelmente causadas pelo baixo S/N. Já a razão de [FeII]/Br γ possui um valor máximo de 2.0 na região localizada 1" ao sul do centro do cubo, com o restante do cubo apresentando valores em torno de 0.8. Este resultado sugere que este pico é causado por choques. O avermelhamento é maior ao longo do eixo maior da galáxia, atingindo um valor máximo de 1.6, com os valores ao norte do centro do cubo mascarados sugerindo um avermelhamento ainda maior nesta região. Isto é compatível com o fato de a UGC 00556 ser uma galáxia praticamente *edge-on*, com notáveis faixas de poeira na sua região equatorial. A taxa de formação estelar integrada ao longo do cubo, que possui um tamanho de ~ 1 kpc², deduzida a partir da linha de Br γ é de 1.22 M_{\odot}/ano . Uma inspeção da Figura 5.5 mostra que a formação estelar está preferencialmente concentrada ao longo do disco da galáxia, e os valores deduzidos condizem com a classificação de objeto em transição. Muito provavelmente a luminosidade infravermelha detectada neste objeto é devida a esta alta taxa de formação estelar.

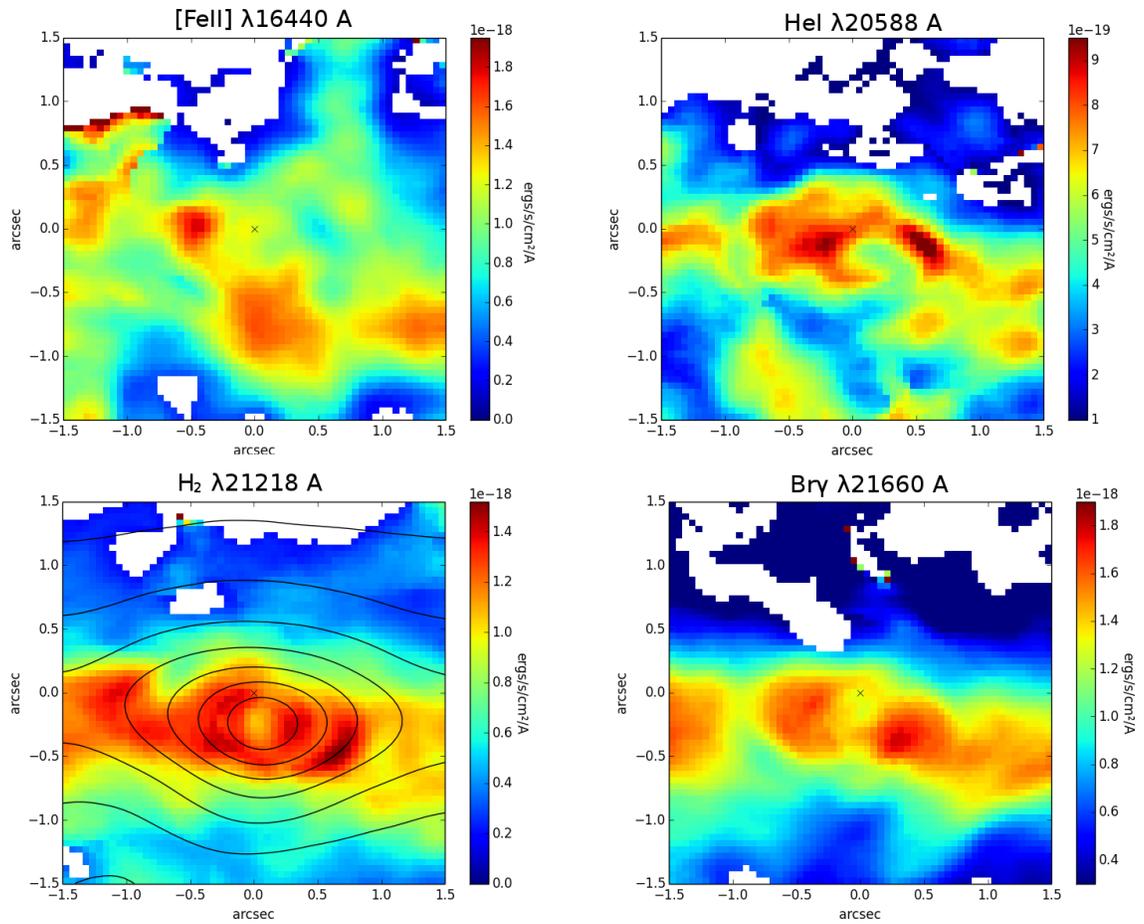


Figura 5.4 – Mapas de distribuição de fluxo para as linhas de [FeII] $\lambda 16440 \text{ \AA}$, HeI $\lambda 20588 \text{ \AA}$, H₂ $\lambda 21212 \text{ \AA}$ e Br γ $\lambda 21660 \text{ \AA}$ da galáxia UGC 00556 retornados pelo *fitcube*. Sobre o mapa da linha de H₂, apresentamos o contorno do contínuo integrado das bandas JHK.

UGC 00556

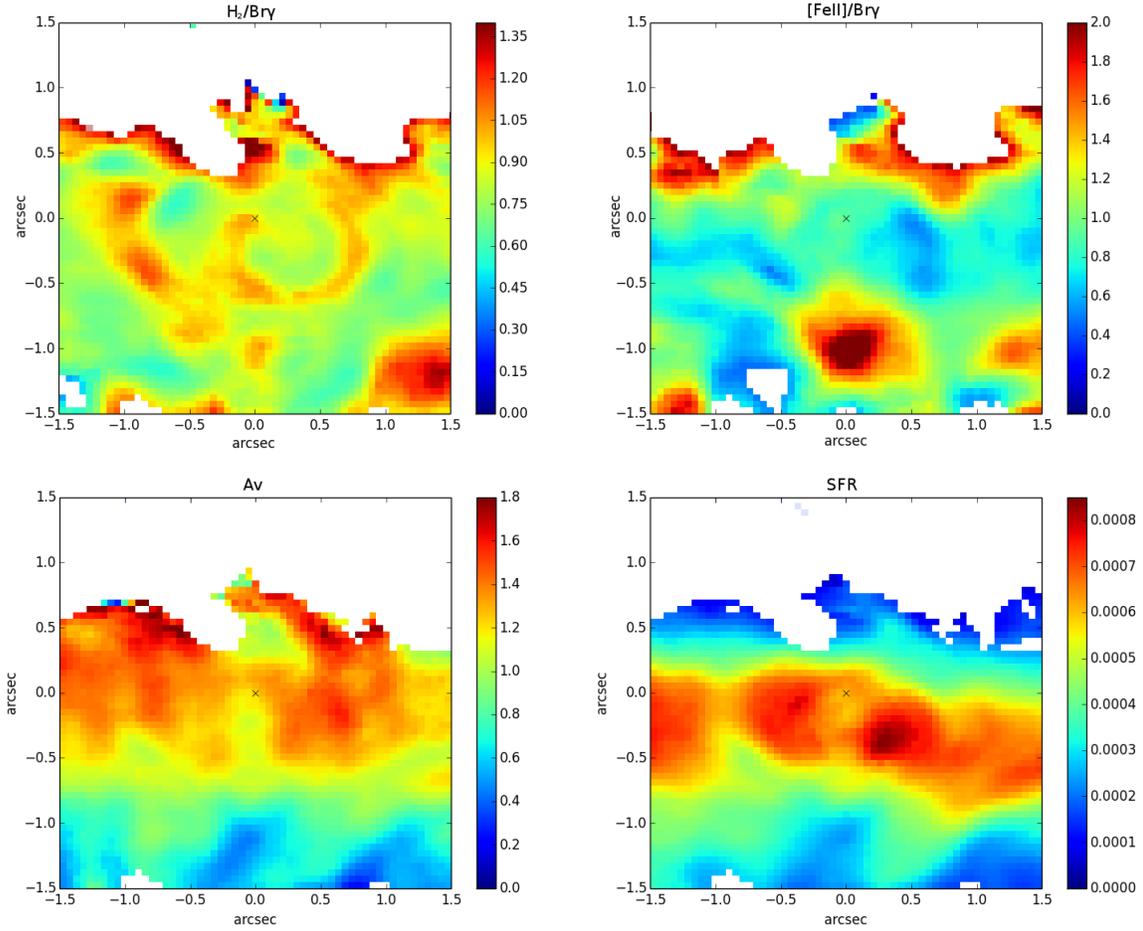


Figura 5.5 – Mapas das razões das linhas de H₂/Bry e [FeII]/Bry, valor de Av deduzido a partir da razão das linhas de Paβ/Bry em magnitudes e a taxa de formação estelar deduzida a partir da linha de Bry corrigida por Av em unidades de M_⊙/ano/píxel para a galáxia UGC 00556.

Na Figura 5.6 são apresentados os mapas de FWHM para as linhas de [FeII] e Bry. Os mapas das linhas de HeI e H₂ não são apresentados porque possuem a mesma cinemática da linha de Bry.

A distribuição dos valores de FWHM do gás em emissão nesta galáxia é baixo, com um valor de 100 km/s na maioria dos casos. Em todas as linhas observadas, no entanto, é visível uma região localizada 1" a oeste do centro do cubo, caracterizada por um FWHM que atinge um máximo de 280 km/s para a linha de [FeII] e de 150 km/s para as demais linhas.

O alargamento observado nas linhas em emissão nesta última região é compatível com a presença de choques no gás. Esta hipótese é coerente com a visão de que as linhas de [FeII] são ótimos traçadores de choques (Forbes et al. 1993; Simpson et al. 1996; Riffel, Rogemar et al. 2013).

No painel superior esquerdo da Figura 5.7, apresentamos o mapa de rotação para a linha de Bry. Foi ajustado um modelo de rotação, mostrado no painel central, com a linha dos nodos sobreposta em cinza. A Figura sugere claramente uma rotação em um plano, muito provavelmente coincidente com o disco da galáxia. O lado próximo e distante foram deduzidos a partir do avermelhamento e da rotação, assumindo que os braços em espiral da galáxia acompanham a rotação da galáxia, e estão indicados juntamente com a linha dos nodos. O resíduo da subtração da rotação observada pela rotação modelada é mostrado no painel superior direito.

No painel inferior da Figura, mostramos a rotação modelada através da linha de [FeII], e o resíduo da subtração pelo modelo da linha de Bry. A rotação estelar observada não apresentou diferenças em relação à rotação das linhas de HeI, H₂ e Bry e por isso não é mostrada.

O baixo resíduo deixado pela subtração da rotação observada de Bry e a rotação modelada sugere a ausência de *inflows* ou *outflows*. Este resultado pode ser facilmente estendido para as linhas de HeI e H₂. No entanto, é possível perceber, no painel inferior direito da Figura 5.7 uma região próxima da borda sudoeste do cubo com um resíduo para a subtração da rotação da linha de [FeII] pelo modelo de rotação deduzido a partir da linha de Bry e que atinge valores de -80 km/s, sugerindo um *outflow* nesta região.

A cinemática estelar para esta galáxia é compatível com rotação em um disco, muito provavelmente acoplada à rotação do gás.

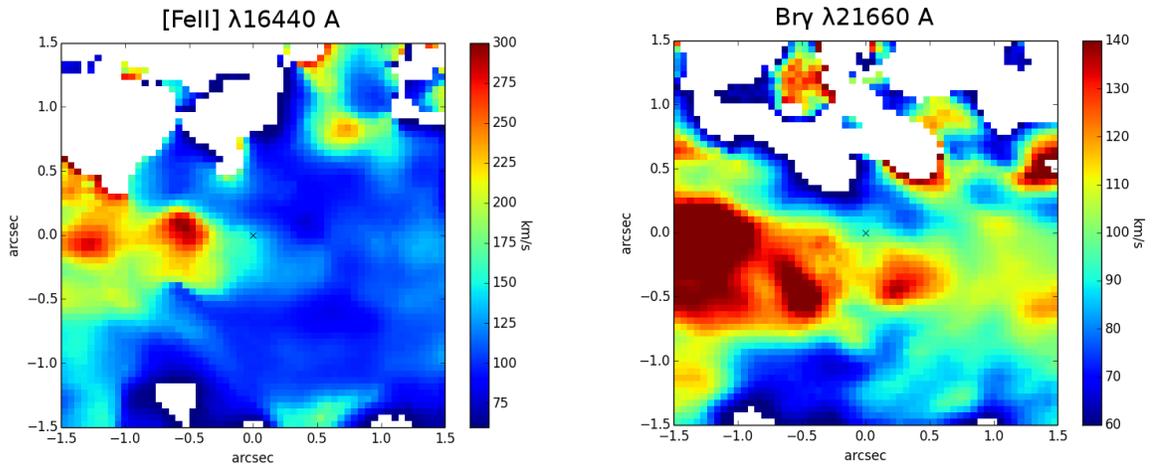


Figura 5.6 – Mapas de FWHM para as linhas de $[\text{FeII}] \lambda 16440 \text{ \AA}$ e $\text{Bry} \lambda 21660 \text{ \AA}$ da galáxia UGC 00556 retornados pelo *fitcube*.

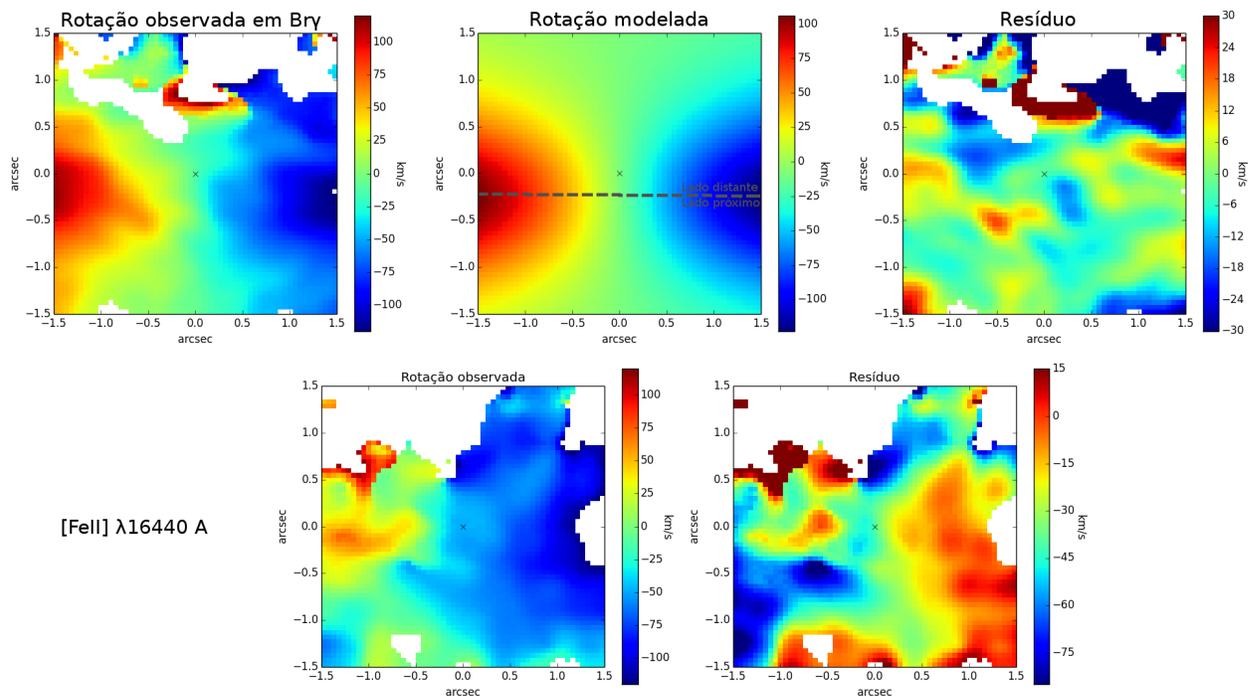


Figura 5.7– No painel superior, à esquerda, curva de rotação observada para a linha de Bry da galáxia UGC 00556, através da qual foi ajustado o modelo ideal de rotação, mostrado no centro, com a linha dos nodos em cinza. À direita, resíduo da subtração. No painel inferior, curva de rotação para a linha de $[\text{FeII}] \lambda 16440 \text{ \AA}$ com o resíduo da subtração pelo modelo de Bry mostrado ao lado.

5.2.1 População estelar

Na Figura 5.8 são apresentados os mapas para a luminosidade emitida por cada uma das classes de população, além de mapas para sua contribuição em massa. Na Figura 5.9, são apresentados mapas para o fator de normalização em 22000 Å (painel superior), idade média deduzida a partir da luminosidade (painel inferior esquerdo) e a partir da massa (painel inferior direito). Na Figura 5.10, mostramos os mapas para a metalicidade média deduzida a partir da luminosidade e a partir da massa, avermelhamento, taxa de formação estelar, χ^2 e Adev.

As populações jovem e intermediária encontram-se distribuídas ao longo de todo o campo IFU, dominando a emissão em luminosidade. Este resultado sugere que estas duas classes de populações estelares são responsáveis por ionizar o gás que produz as linhas de HeI, H₂ e Br γ . Já a ionização de [FeII] aparenta ter contribuições de mecanismos adicionais além da fotoionização pelo fato de sua distribuição não se aproximar a nenhuma destas populações estelares encontradas na síntese.

O avermelhamento e a taxa de formação estelar foram muito superiores aos valores deduzidos a partir da razão Pa β /Br γ e da linha de Br γ , respectivamente. Isto confirma os resultados encontrados na amostra APO, com uma superestimativa que chegou a 3 vezes para os valores da taxa de formação estelar e 4 vezes para os valores do avermelhamento.

A taxa de formação estelar deduzida a partir da síntese é maior na região do plano da galáxia, e sua distribuição é similar à distribuição de fluxo das linhas de Br γ e H₂.

Na região com um pico no FWHM, é também observado um aumento na taxa de formação estelar. Este resultado é compatível com a ideia de choques nesta região, muito provavelmente causados por eventos de supernovas decorrentes da alta taxa de formação estelar.

UGC 00556 - População estelar

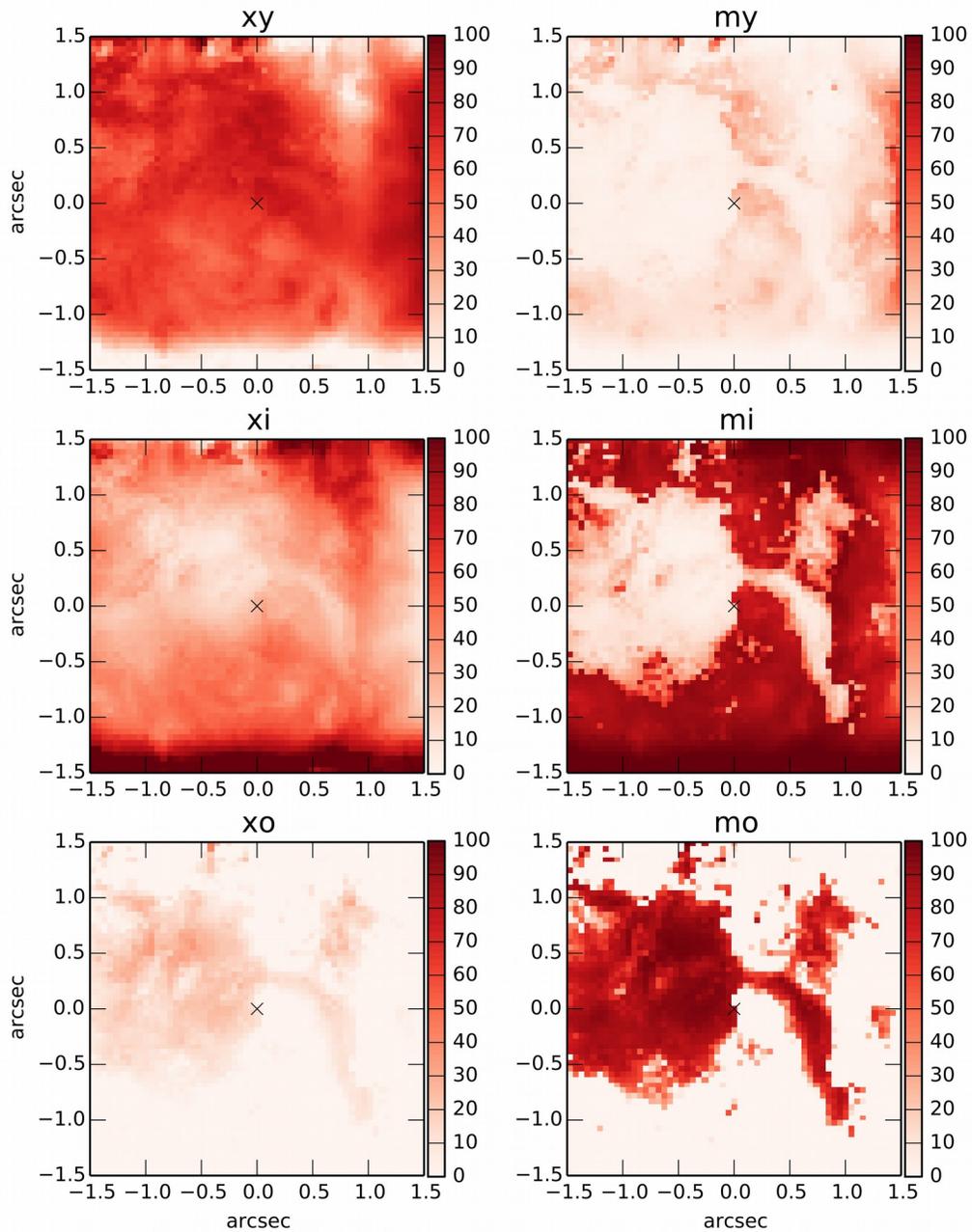


Figura 5.8 – Contribuição em porcentagem em massa e em luminosidade para as diferentes populações estelares da a galáxia UGC 00556 obtidas a partir do programa *starlight*.

UGC 00556

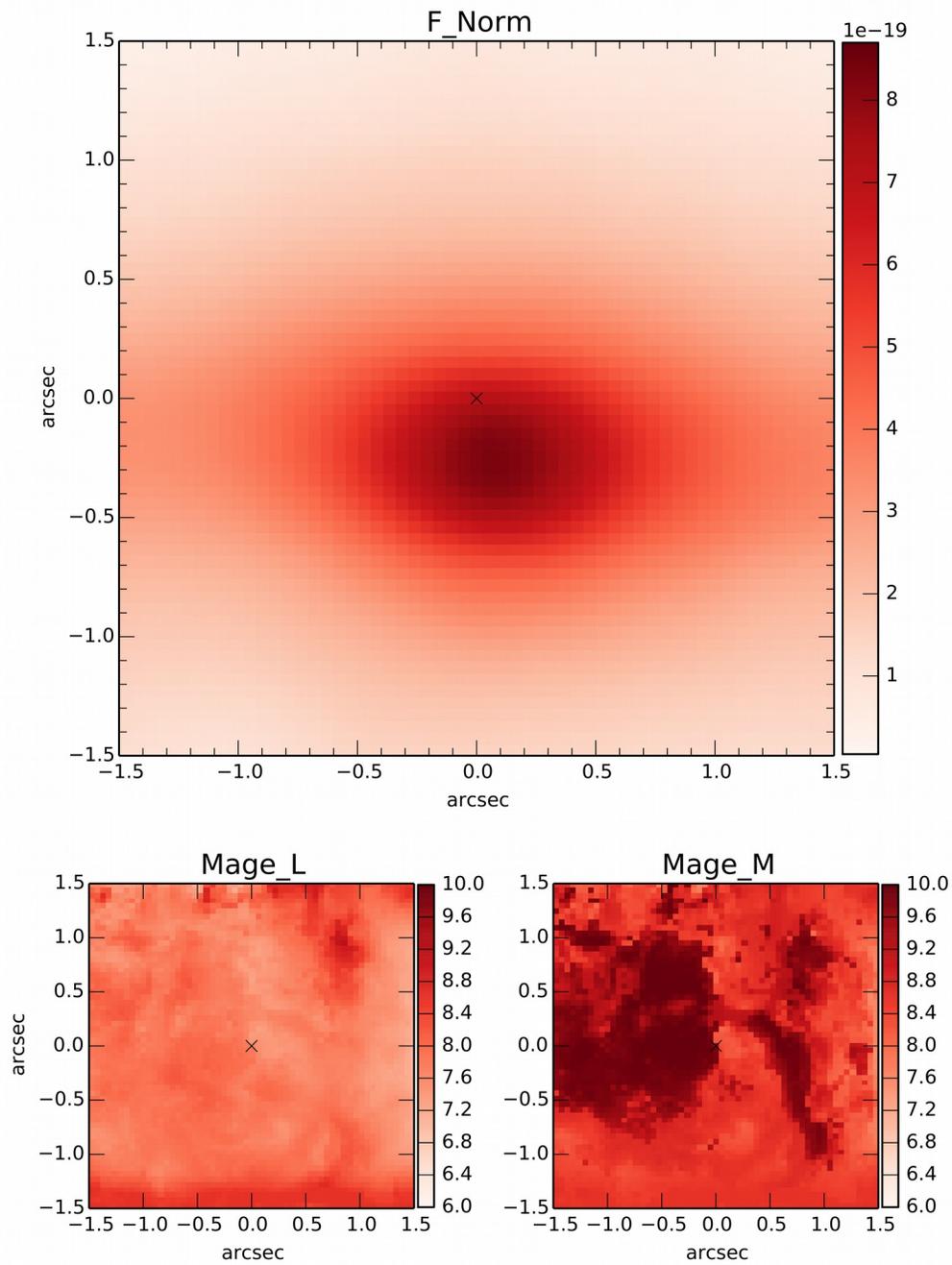


Figura 5.9 – Fatores de normalização e valores do logaritmo da idade média deduzidos a partir da massa e luminosidade para a galáxia UGC 00556.

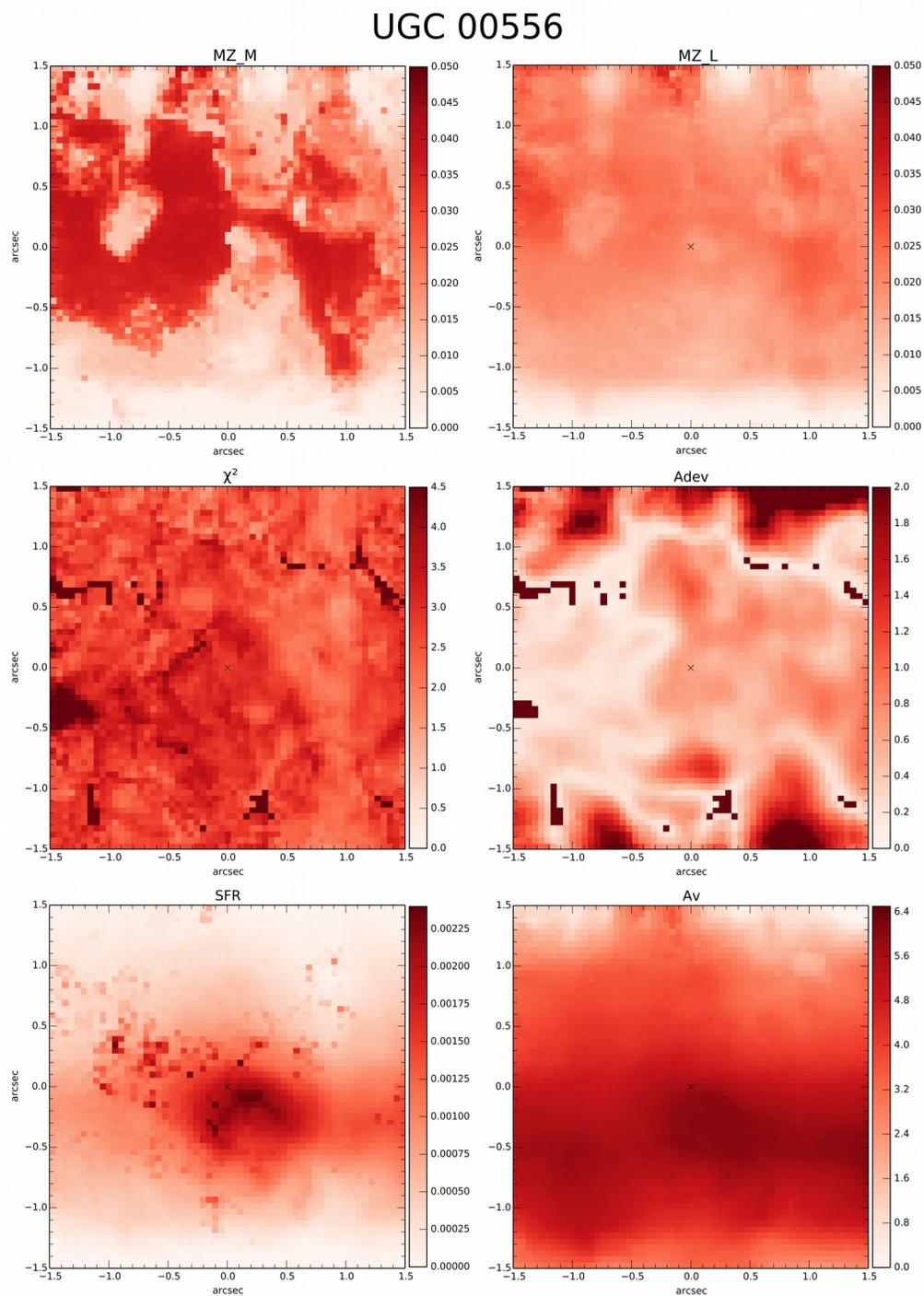


Figura 5.10 – Valores de metalicidade (Z) deduzidos a partir da massa e luminosidade, χ^2 , Adev, SFR em unidades de $M_{\odot}/\text{ano}/\text{p\xi\text{e}l}$ e A_v em magnitudes encontrados pelo *starlight* para a galáxia UGC 00556.

5.3 UGC 02982

Na Figura 5.11, são apresentados os mapas de distribuição de fluxo para as linhas de [FeII] $\lambda 16440$ Å, H₂ $\lambda 21212$ Å e Br γ $\lambda 21660$ Å da galáxia UGC 02982. No mapa da linha de H₂, mostramos os contornos do contínuo integrado das bandas JHK. Na Figura 5.12, são mostrados os mapas de razões das linhas de H₂ $\lambda 21212$ Å/Br γ e [FeII] $\lambda 16440$ Å/Br γ , o mapa de avermelhamento deduzido a partir da razão de Pa β /Br γ e o mapa da taxa de formação estelar deduzida a partir do fluxo da linha de Br γ corrigida por A_v em unidades de M_⊙/ano/píxel.

Uma inspeção à Figura 5.11 revela que as três linhas se distribuem de maneira muito diferente. A emissão da linha de H₂ encontra-se concentrada preferencialmente ao longo do eixo maior da galáxia. A linha de Br γ possui uma distribuição praticamente homogênea ao longo do campo de visão do IFU, possuindo valores em torno de 1.3×10^{-18} ergs/s/cm²/Å, com um pico próximo da borda noroeste do campo de visão do cubo atingindo valores de 2.7×10^{-18} ergs/s/cm²/Å. Este resultado é compatível com a posição de seus pontos no diagrama da Figura 5.3, indicando uma região de formação estelar. Já a linha de [FeII] possui um pico de emissão próximo ao centro do cubo, com valores mais baixos no restante do campo.

No centro do cubo, as razões de [FeII]/Br γ e H₂/Br γ atingem valores maiores que 1, com valores mais baixos no restante do cubo. Este resultado, como visto no diagrama da Figura 5.3, sugere uma região central dominada por emissão LINER. As regiões fora do núcleo tendem a ser dominadas por formação estelar.

O avermelhamento é menor no centro do cubo, o que sugere um bojo com baixa quantidade de poeira nesta região. A taxa de formação estelar integrada para todo o cubo (com uma área de ~ 1.3 kpc²) derivada a partir da linha de Br γ é de 2.28 M_⊙/ano.

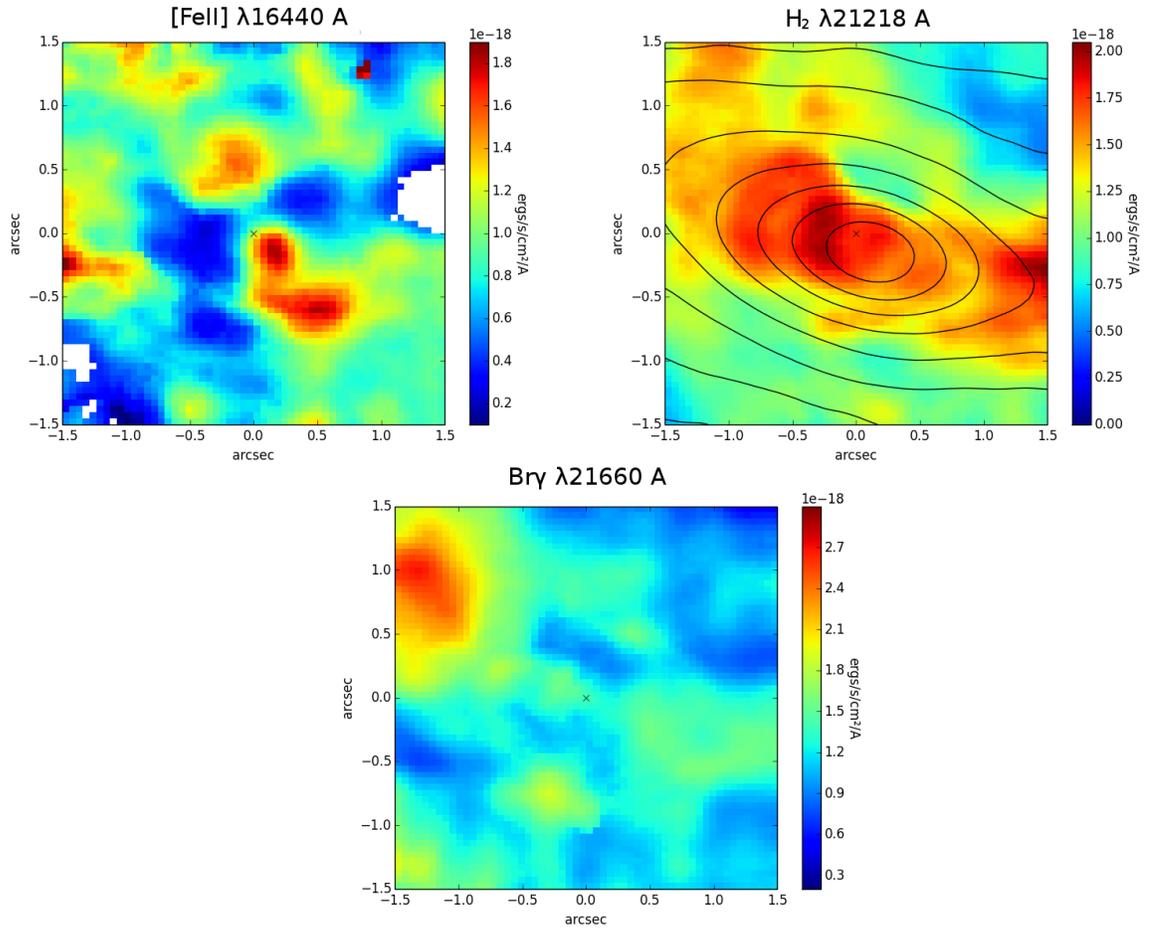


Figura 5.11 – Mapas de distribuição de fluxo para as linhas de [FeII] $\lambda 16440 \text{ \AA}$, $\text{H}_2 \lambda 21212 \text{ \AA}$ e Br $\gamma \lambda 21660 \text{ \AA}$ da galáxia UGC 02982 retornados pelo *fitcube*. Sobre o mapa da linha de H_2 , mostramos os contornos do contínuo integrado das bandas JHK.

UGC 02982

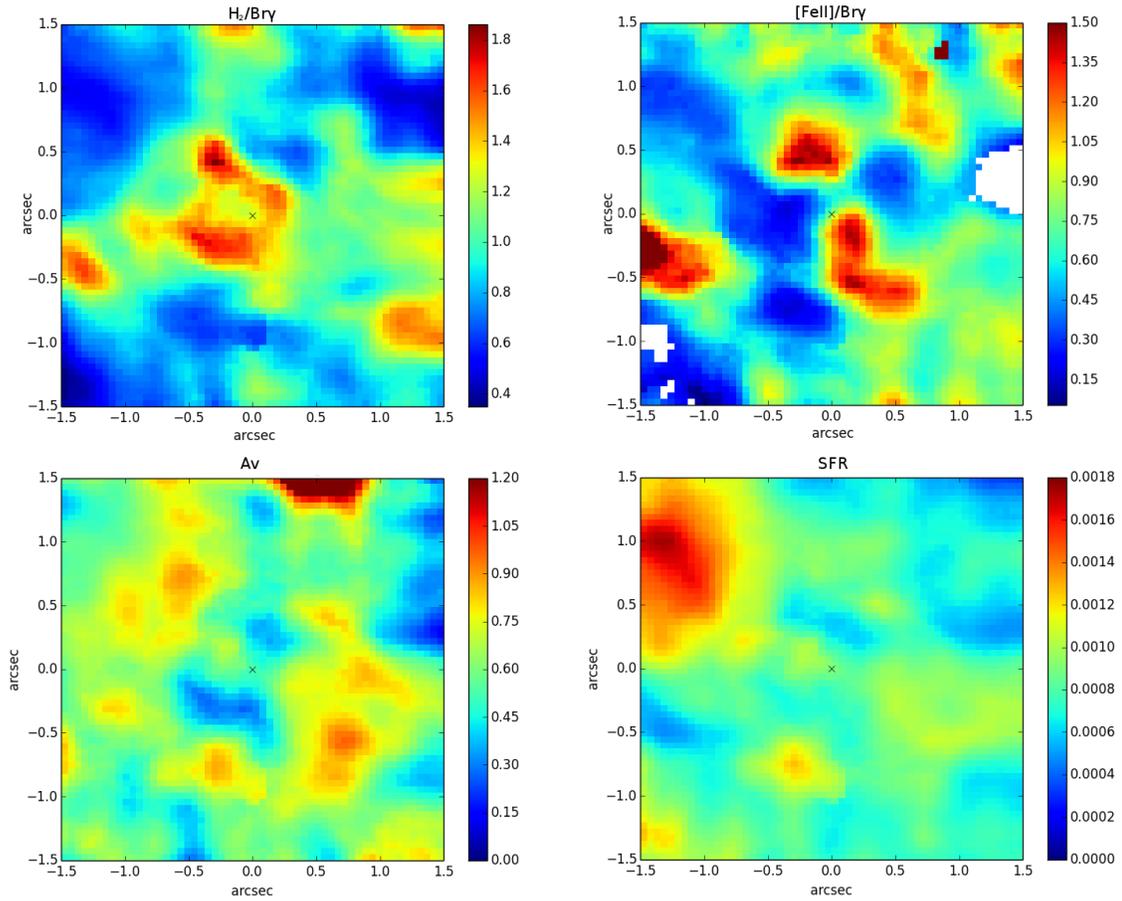


Figura 5.12 – Mapas das razões das linhas de H_2/B_{Br} e $[\text{FeII}]/B_{\text{Br}}$, valor de A_v deduzido a partir das razões de linhas de $\text{Pa}\beta/B_{\text{Br}}$ em magnitudes e a taxa de formação estelar deduzida a partir da linha de B_{Br} corrigida por A_v e em unidades de $M_{\odot}/\text{ano}/\text{píxel}$ para a galáxia UGC 02982.

Na Figura 5.13 são apresentados os mapas para o FWHM das linhas de [FeII] e Br γ . A linha de H $_2$ não foi apresentada por possuir uma distribuição muito similar à de Br γ .

O mapa de FWHM para as duas linhas acima possui valores menores que 125 km/s na maior parte do cubo. O núcleo, por sua vez, tem valores de FWHM próximos de 250 km/s, o que suporta a ideia de um núcleo ativo. Este resultado é compatível com a presença de emissão rádio nesta galáxia.

No painel superior esquerdo da Figura 5.14, é mostrado o mapa de posição-velocidade (PV) para a linha de Br γ . H $_2$ e [FeII] seguem o mesmo padrão e por isso não são apresentadas. A partir do mapa PV, foi ajustado um modelo de rotação, o qual é mostrado no painel central com a linha dos nodos sobreposta. A Figura indica que o gás segue um padrão de rotação em forma de disco coincidente com o disco da galáxia. Por não possuímos uma evidência clara de avermelhamento em uma direção específica do campo IFU, não é possível determinar o lado próximo e distante da galáxia. No painel direito, é mostrado o resíduo da subtração da rotação observada e a rotação modelada. Os baixos resíduos observados (com valores máximos de 24 km/s) indicam que o gás molecular e ionizado está distribuído preferencialmente ao longo do disco da galáxia.

Após a subtração da rotação estelar observada da rotação modelada para a linha de Br γ , os resíduos observados revelaram um padrão de rotação residual, o que sugere que estas duas componentes possuem amplitudes de rotação diferentes. Por isto, construímos um novo modelo, desta vez a partir do mapa PV estelar observado. O resultado é mostrado nos painéis inferiores da Figura 5.15. O resíduo deixado após a subtração do novo modelo de rotação estelar possui valores entre -30 e +30 km/s. Estes resultados podem ser entendidos em termos de uma rotação coplanar para o gás e as estrelas, sem a presença de *inflows* ou *outflows*, com uma amplitude menor para a rotação estelar por ser uma rotação mais fria (ou seja, que possui uma componente no vetor velocidade na direção perpendicular ao disco da galáxia).

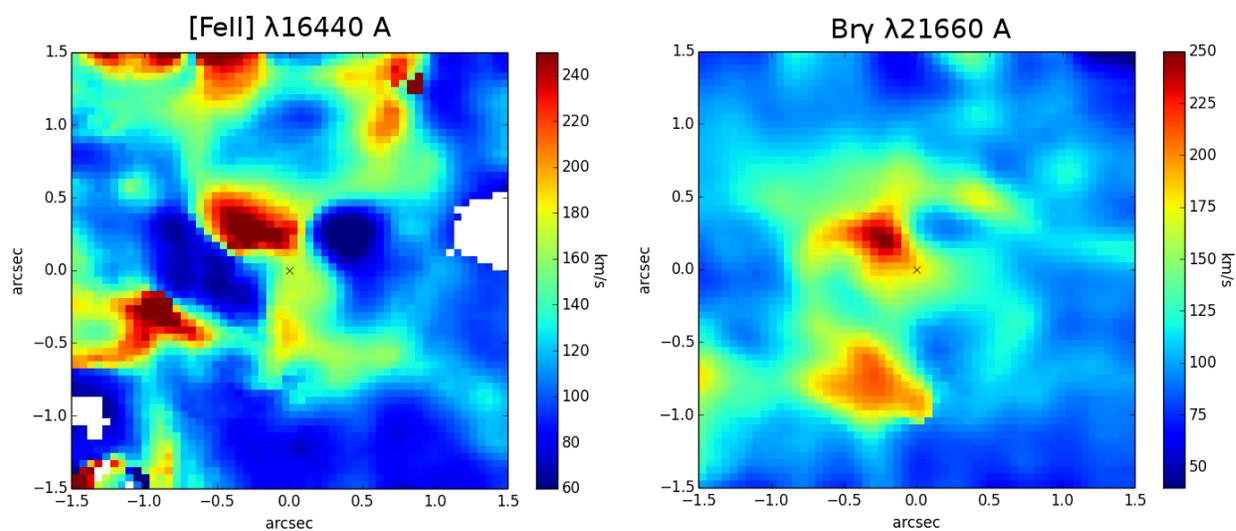


Figura 5.13 – Mapas de FWHM para as linhas de [FeII] $\lambda 16440 \text{ \AA}$ e Bry da galáxia UGC 02982 calculados pelo *fitcube*.

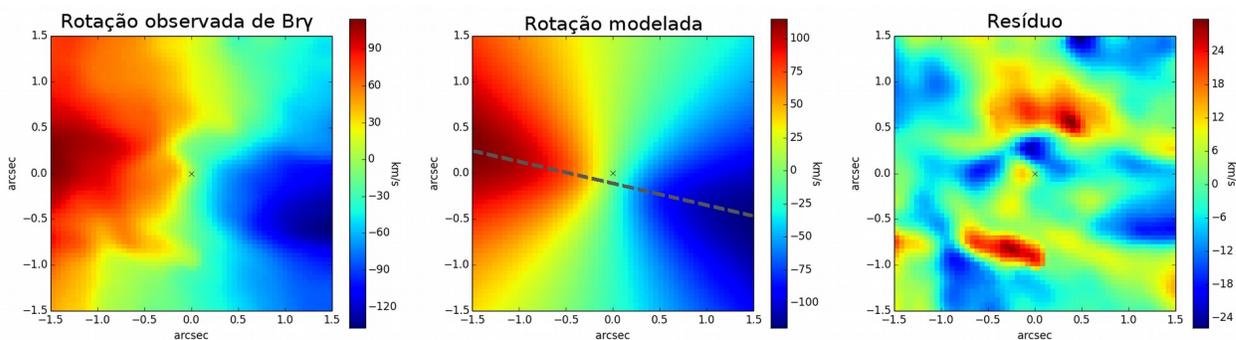


Figura 5.14– No painel esquerdo, curva de rotação observada para a linha de Bry da galáxia UGC 02982, através da qual foi ajustado o modelo ideal de rotação, mostrado no centro, com a linha dos nodos em cinza. À direita, resíduo da subtração.

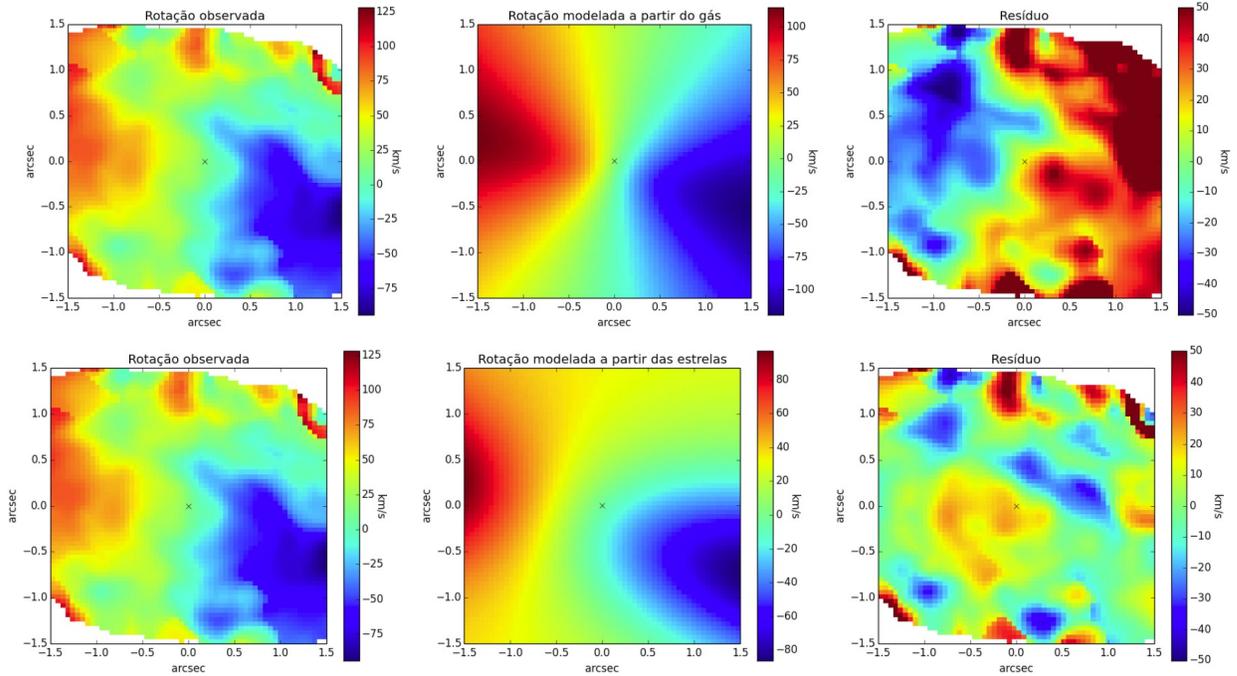


Figura 5.15 – Rotação estelar da galáxia UGC 02982, deduzida a partir das bandas de CO na banda K. O resíduo da subtração da rotação estelar pelo modelo da rotação do gás mostraram amplitudes diferentes, de modo que um novo modelo foi deduzido a partir da rotação estelar. O resíduo é mostrado para os dois casos

5.3.1 População estelar

Na Figura 5.16 são apresentados os mapas para a luminosidade emitida por cada uma das classes de população, além de mapas para sua contribuição em massa. Na Figura 5.17, são apresentados mapas para o fator de normalização em 22000 \AA (painel superior), idade média deduzida a partir da luminosidade (painel inferior esquerdo) e a partir da massa (painel inferior direito). Na Figura 5.18, mostramos os mapas para a metalicidade média deduzida a partir da luminosidade e a partir da massa, avermelhamento, taxa de formação estelar, χ^2 e Adev.

A população velha encontra-se concentrada em uma região próxima do centro do cubo, rodeada por uma população predominantemente jovem. Este resultado é compatível com a posição

de seus pontos no diagrama da Figura 5.3, indicando uma região central dominada por um núcleo ativo e as demais regiões dominadas por uma intensa formação estelar.

O avermelhamento e a taxa de formação estelar foram muito superiores aos valores deduzidos a partir da razão P_{β}/B_{γ} e da linha de B_{γ} , respectivamente, com uma superestimativa que chegou a 14 vezes para os valores da taxa de formação estelar em algumas regiões e 4 vezes para os valores do avermelhamento em praticamente todo o cubo.

O avermelhamento encontrado a partir da síntese é menor em uma região próxima ao núcleo, coincidente com a região com as baixas taxas de formação estelar. Este resultado indica uma região com baixa quantidade de gás e poeira em seu núcleo, o que dificulta a formação estelar nesta região.

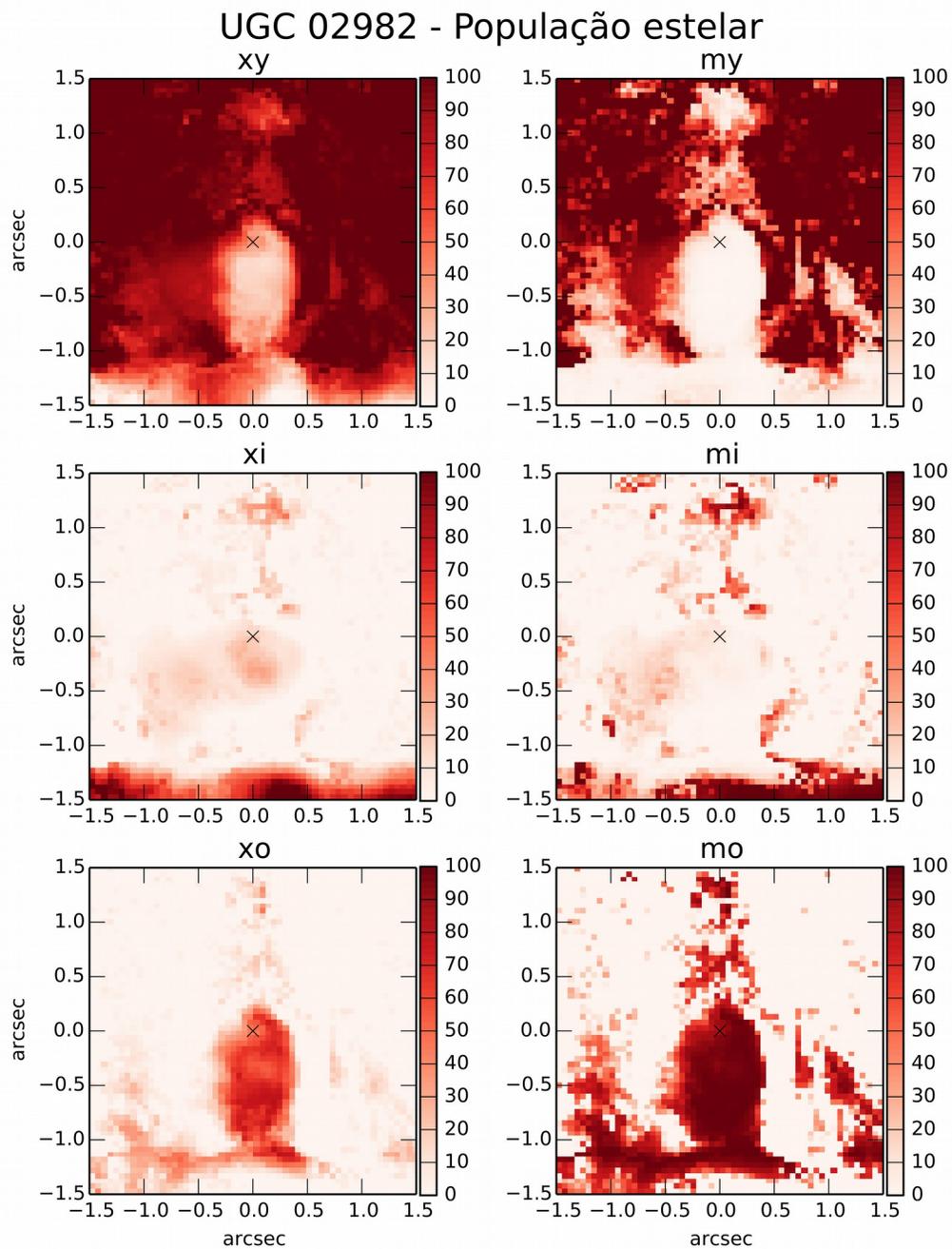


Figura 5.16 – Contribuição em porcentagem em massa e em luminosidade para as diferentes populações estelares da galáxia UGC 02982 obtidas a partir do programa *starlight*.

UGC 02982

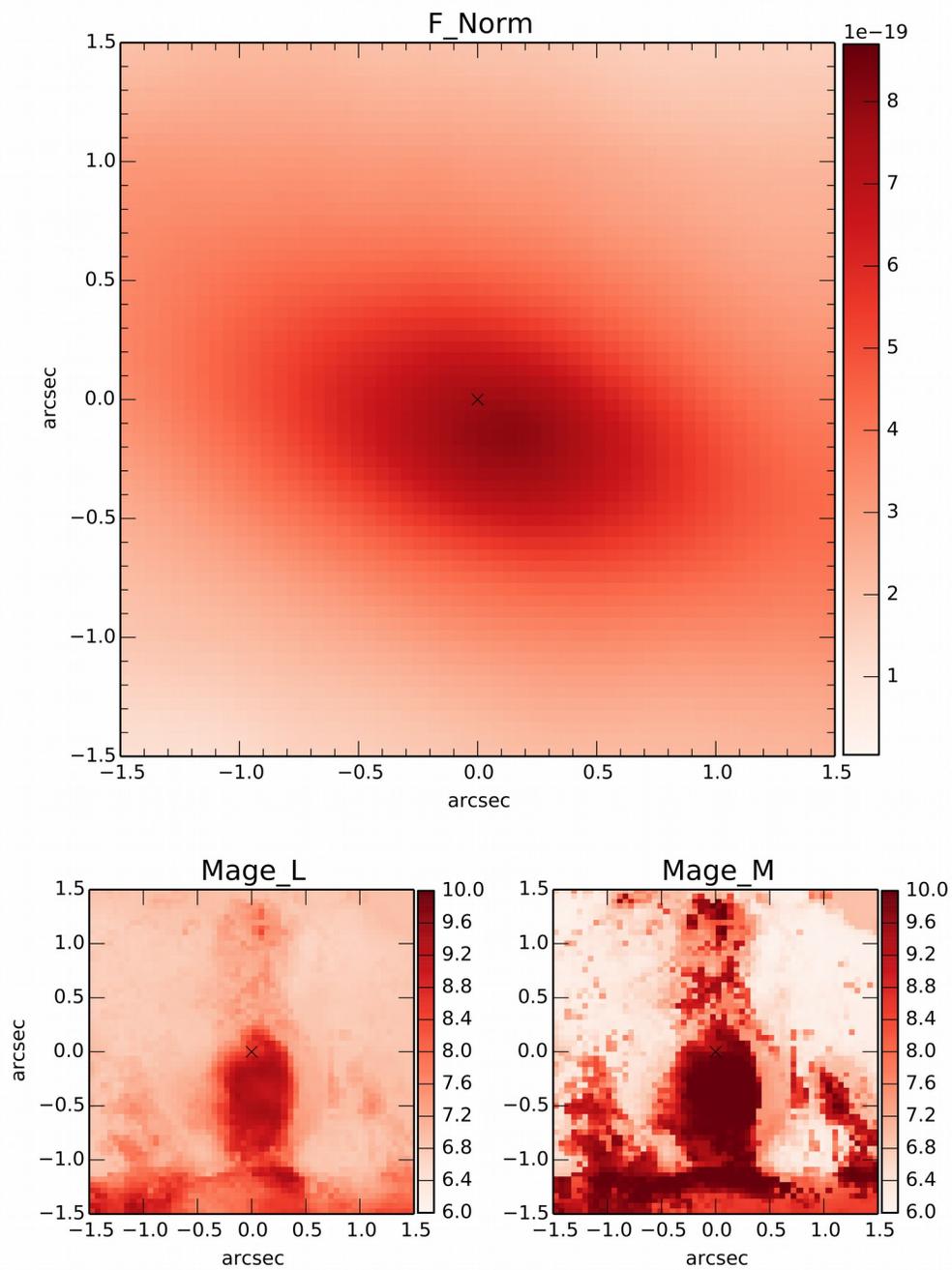


Figura 5.17 – Fatores de normalização e valores do logaritmo da idade média deduzidos a partir da massa e luminosidade para a galáxia UGC 02982.

UGC 02982

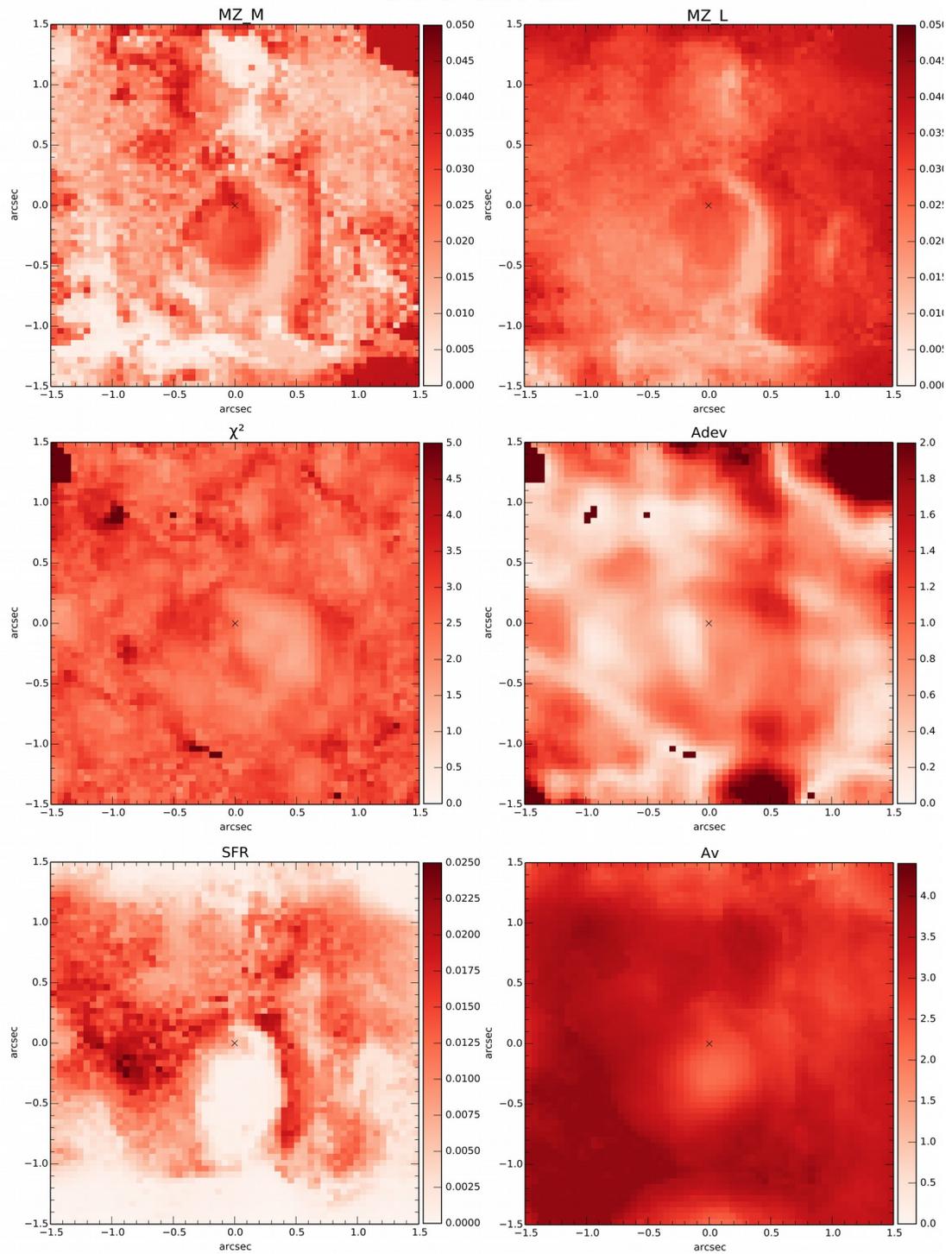


Figura 5.18 – Valores de metalicidade (Z) deduzidos a partir da massa e luminosidade, χ^2 , Adev, SFR em unidades de $M_{\odot}/\text{ano}/\text{p\u00edxel}$ e Av em magnitudes encontrados pelo *starlight* para a gal\u00e1xia UGC 02982.

5.4 UGC 12914

Na Figura 5.19, são apresentados os mapas de distribuição de fluxo para as linhas de [FeII] $\lambda 16440$ Å, HeI $\lambda 20588$ Å, H₂ $\lambda 21212$ Å e Br γ $\lambda 21660$ Å da galáxia UGC 12914. Mostramos nos mapas das linhas de H₂ e Br γ os contornos do contínuo integrado das bandas JHK. Na Figura 5.20, são mostrados os mapas de razões das linhas de H₂ $\lambda 21212$ Å/Br γ e [FeII] $\lambda 16440$ Å/Br γ , o mapa do avermelhamento em magnitudes deduzido a partir da razão de Pa β /Br γ e o mapa da taxa de formação estelar deduzida a partir do fluxo da linha de Br γ corrigida por A_v em unidades de M_{\odot}/ano .

Através da Figura 5.19, é possível perceber a ausência de emissões se estendendo além do núcleo no limite imposto pelo *seeing* para as linhas de Hidrogênio ionizado, HeI e [FeII]. Este resultado sugere um mecanismo LINER na região central responsável pela ionização destas linhas. Este resultado é compatível com a presença de emissão rádio nesta galáxia, sugerindo que esta emissão é causada por um buraco negro central acretando matéria.

Já a linha de H₂ se estende ao longo de todo o campo de visão do IFU, o que indica que a ionização desta linha ocorre através de mecanismos adicionais. O pico em sua emissão encontra-se deslocado do centro na direção da ponte ligando esta galáxia à sua companheira.

Como não foram encontradas emissões estendidas para 3 das quatro linhas em emissão encontradas, os valores de cinemática são mostrados na Tabela 5.3 para a mesma região de 0.35 segundos de diâmetro indicada na Figura 2.5. Os altos valores de FWHM na região central vistos nesta Tabela são compatíveis com a ideia de um mecanismo LINER central.

No painel superior esquerdo da Figura 5.21, é mostrado o mapa PV para a rotação estelar. A partir deste, foi ajustado um modelo de rotação o qual é mostrado no painel superior central, com a linha dos nodos sobreposta. A Figura indica que as estrelas seguem um padrão de rotação em forma de disco. Por não possuímos uma evidência clara de avermelhamento em uma direção específica do campo IFU, não é possível determinar o lado próximo e distante da galáxia. No painel direito, é mostrado o resíduo da subtração da rotação observada e a rotação modelada. Os baixos resíduos observados sugerem a ausência de *inflows* ou *outflows* estelares.

Após a subtração da rotação observada para o gás referente à linha de H_2 pela rotação modelada para as estrelas, os resíduos observados revelaram um padrão de rotação residual, o que sugere que estas duas componentes possuem amplitudes de rotação diferentes. Devido ao baixo S/N da linha de H_2 , não foi possível construir um novo modelo. Estes resultados podem ser entendidos em termos de uma rotação coplanar para o gás e as estrelas, sem a presença de inflows ou outflows, com uma amplitude menor para a rotação estelar por ser uma rotação mais fria.

UGC 12914

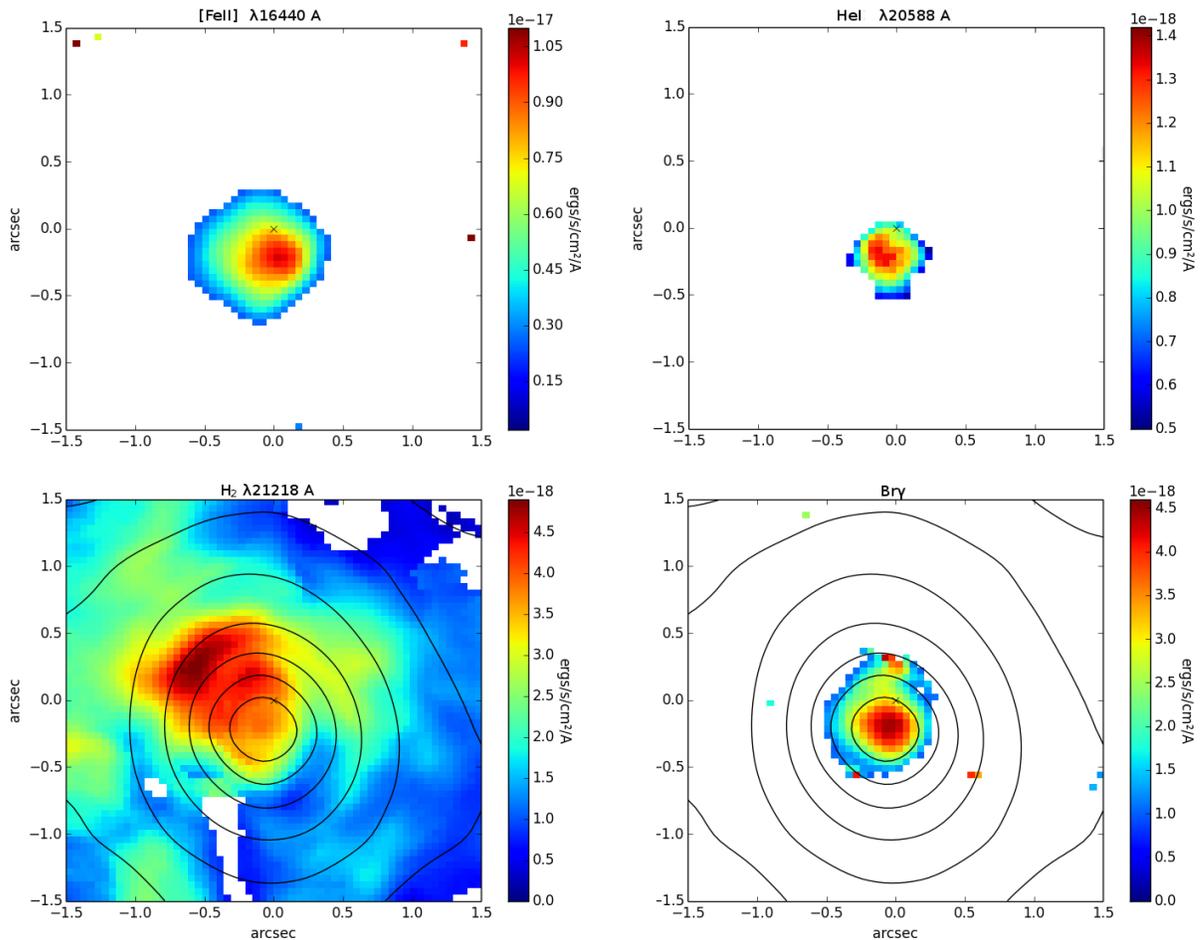


Figura 5.19 – Mapas de distribuição de fluxo das linhas de $[FeII] \lambda 16440 \text{ \AA}$, $HeI \lambda 20588 \text{ \AA}$, $H_2 \lambda 21212 \text{ \AA}$ e $Br\gamma \lambda 21660 \text{ \AA}$ da galáxia UGC 12914. Sobre os mapas das linhas de H_2 e $Br\gamma$, apresentamos o contorno do contínuo integrado das bandas JHK.

UGC 12914

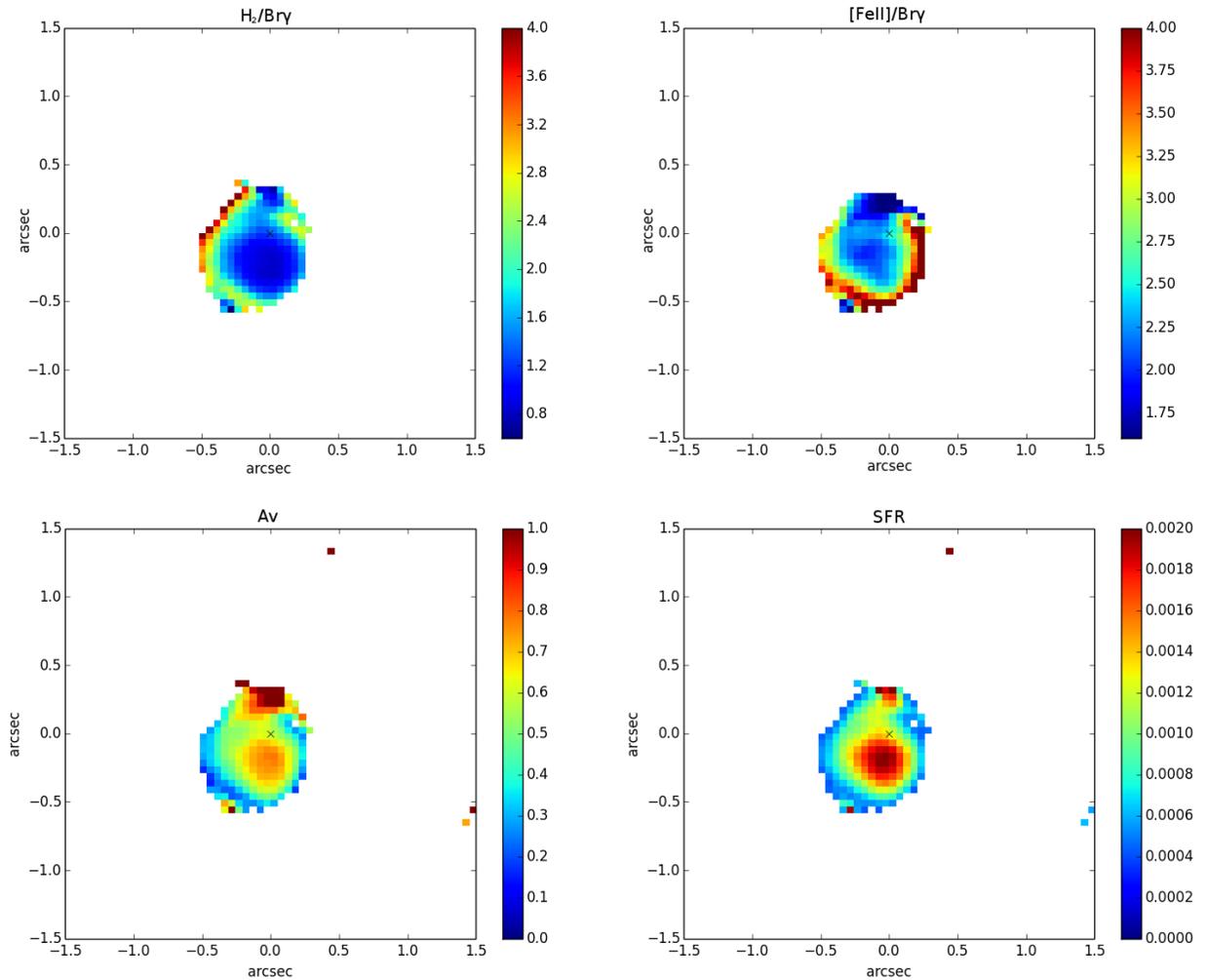


Figura 5.20 – Mapas das razões das linhas de H_2/B_{γ} e $[FeII]/B_{\gamma}$, valor de A_v deduzido a partir das razões de linhas de $Pa\beta/B_{\gamma}$ em magnitudes e a taxa de formação estelar em $M_{\odot}/\text{ano}/\text{pixel}$ deduzida a partir da linha de B_{γ} corrigida por A_v para a galáxia UGC 12914.

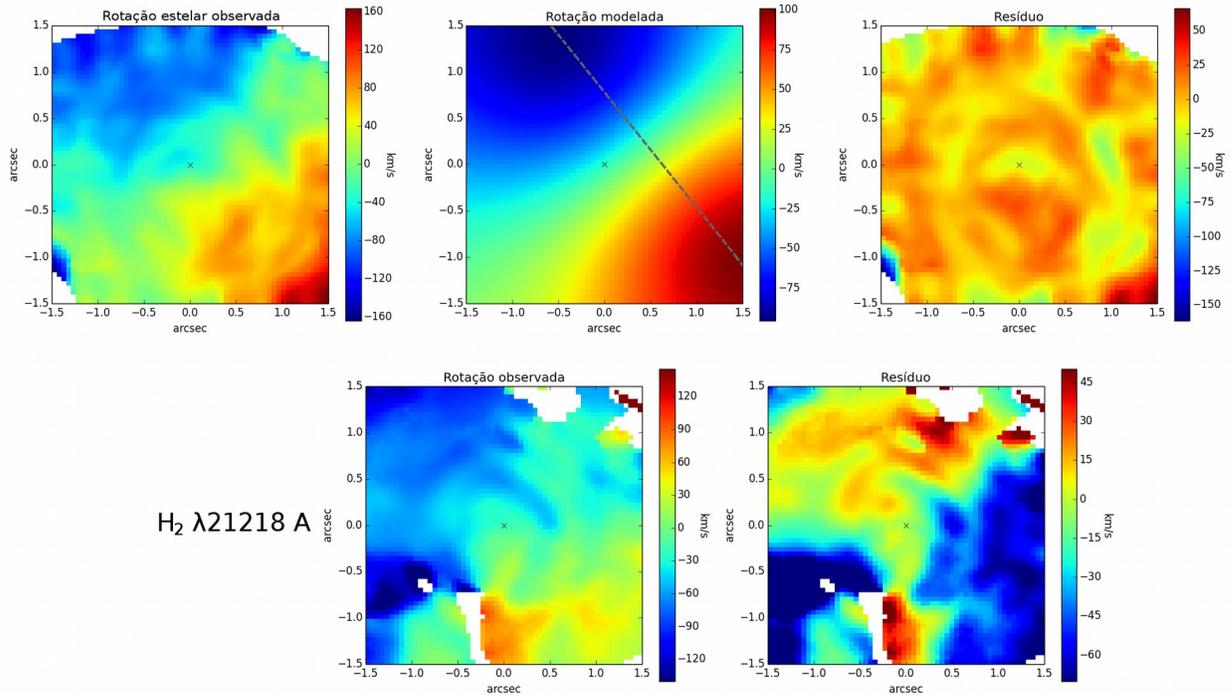


Figura 5.21 – No painel superior, rotação estelar observada, modelada e resíduo da subtração para a UGC 12914. A linha dos nodos para o modelo é mostrada em cinza. No painel inferior, rotação observada para a linha de H₂ e resíduo da subtração da rotação observada pela rotação estelar modelada.

Tabela 5.3 – Valores de fluxo, velocidade média e FWHM obtidos para as linhas presentes em uma região de 0.35 segundos de diâmetro centrada no núcleo da galáxia UGC 12914.

Linha	Velocidade média (km/s)	FWHM (km/s)
[FeII] λ 16440 Å	-6	220
HeI λ 20588 Å	30	165
H ₂ λ 21218 Å	0	233
B γ	14	233

5.4.1 Síntese de população estelar

Na Figura 5.22 são apresentados os mapas para a luminosidade emitida por cada uma das classes de população, além de mapas para sua contribuição em massa. Na Figura 5.23, são apresentados mapas para o fator de normalização em 22000 Å (painel superior), idade média deduzida a partir da luminosidade (painel inferior esquerdo) e a partir da massa (painel inferior direito). Na Figura 5.24, mostramos os mapas para a metalicidade média deduzida a partir da luminosidade e a partir da massa, avermelhamento, taxa de formação estelar, χ^2 e Adev.

A população velha encontra-se distribuída ao redor do núcleo em uma região com o formato de um anel, com uma contribuição em luminosidade da ordem de 25% e dominando a contribuição em massa. A população jovem encontra-se distribuída ao longo de todo o campo do IFU, com valores menores ao longo do anel de população velha. Não foram encontradas contribuições significativas de população intermediária.

O avermelhamento e a taxa de formação estelar encontrados através do ajuste de população estelar foram muito superiores aos valores deduzidos a partir da razão Pa β /Br γ e da linha de Br γ , respectivamente. A taxa de formação estelar é superestimada em cerca de uma ordem de grandeza, enquanto que os valores de avermelhamento são 4 vezes maiores que os valores deduzidos a partir da razão de Pa β /Br γ .

A taxa de formação estelar encontra-se restrita ao centro do cubo, indicando que uma parcela da ionização é causada por formação estelar. A baixa taxa de formação estelar nas demais regiões é compatível com a ausência de linhas de hidrogênio ionizado, HeI e [FeII] fora do núcleo. A distribuição estendida da população jovem sugere que a ionização das linhas de H $_2$ ocorre basicamente por estrelas jovens, embora estas estrelas ocorram em quantidades incapazes de ionizar as demais linhas.

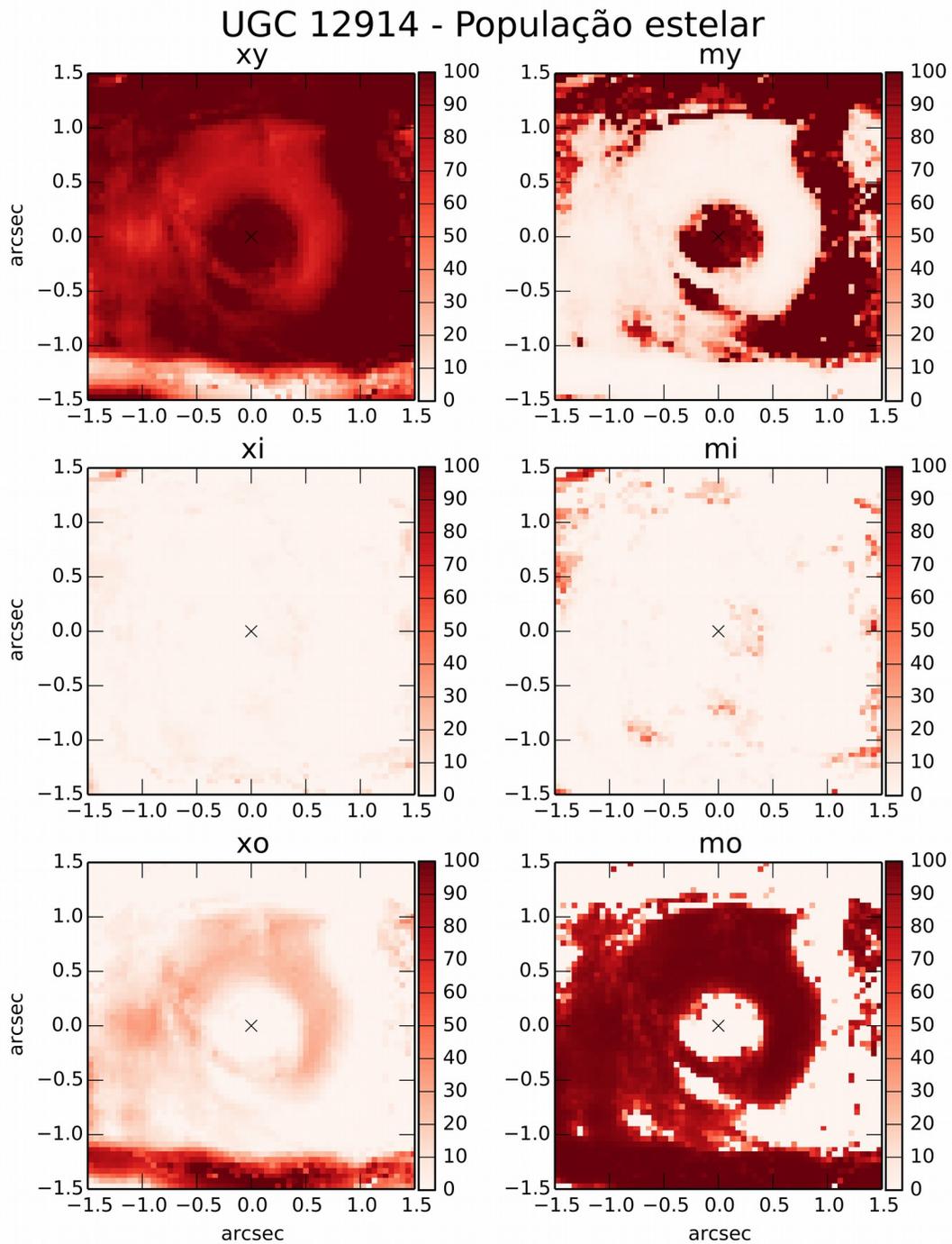


Figura 5.22 – Contribuição em porcentagem em massa e em luminosidade para as diferentes populações estelares da galáxia UGC 12914 obtidas a partir do programa *starlight*.

UGC 12914

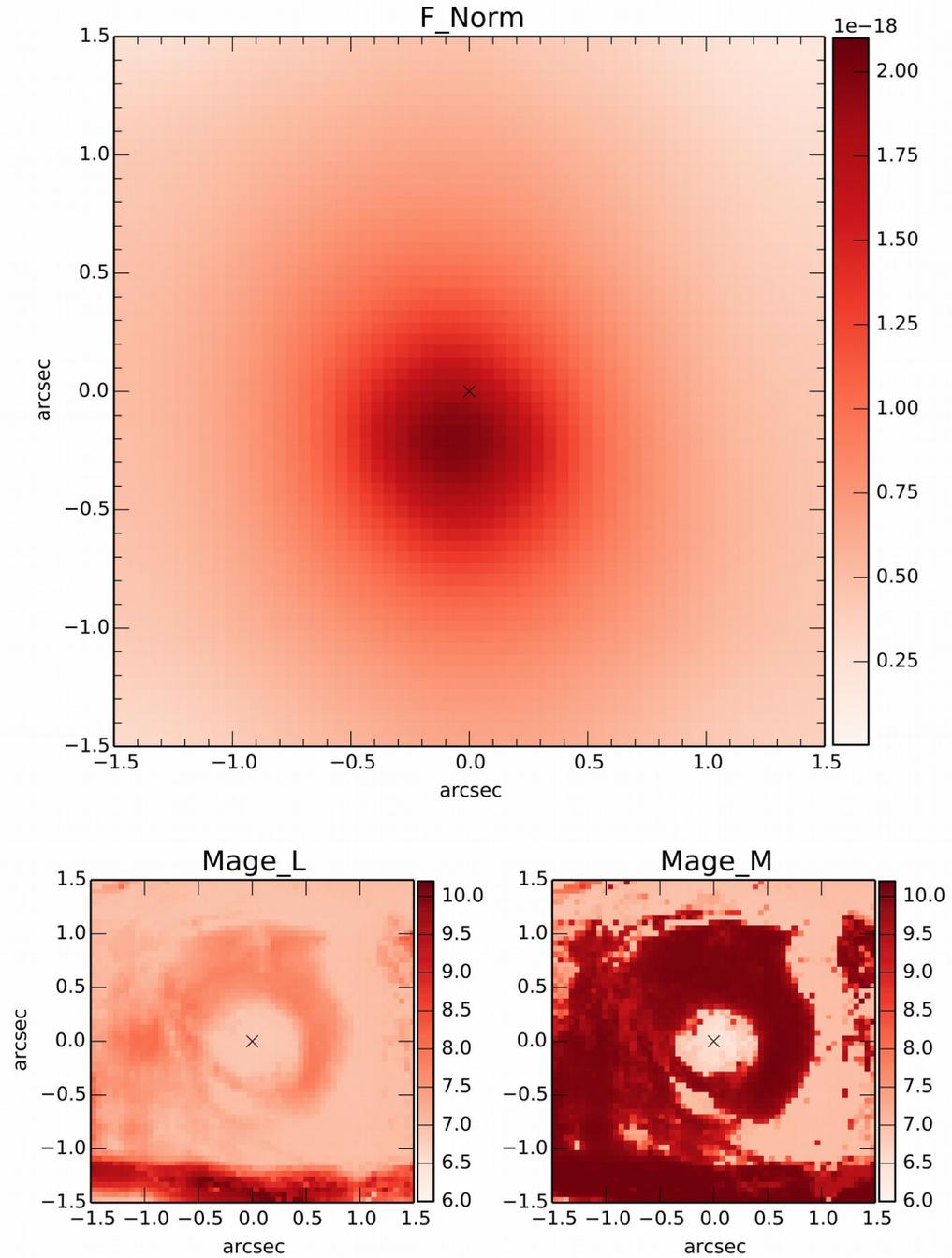


Figura 5.23 – Fatores de normalização e valores do logaritmo da idade média deduzidos a partir da massa e luminosidade para a galáxia UGC 12914.

UGC 12914

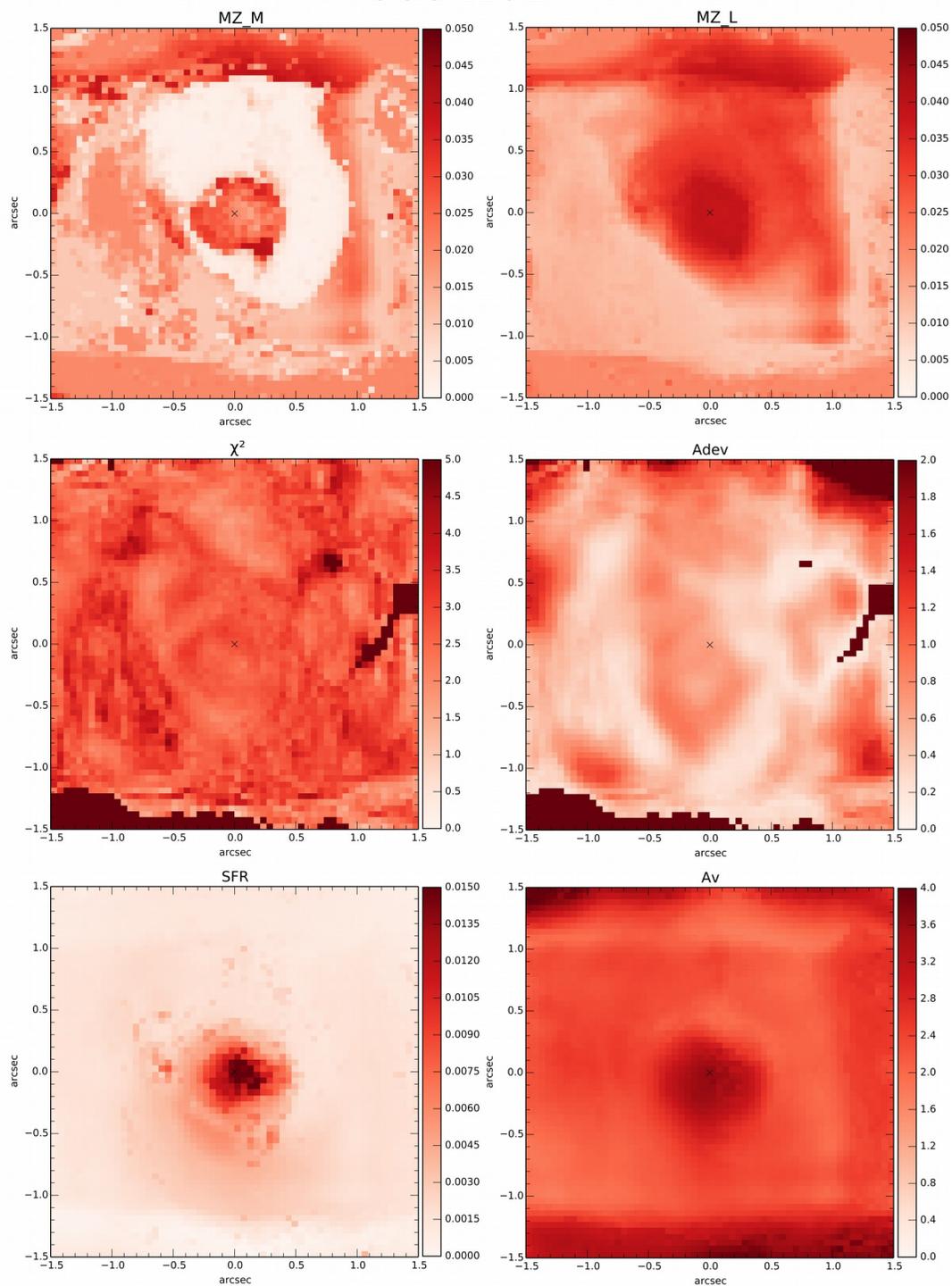


Figura 5.24 – Valores de metalicidade (Z) deduzidos a partir da massa e luminosidade, χ^2 , Adev, SFR em unidades de $M_{\odot}/\text{ano}/\text{p\acute{a}xel}$ e A_v em magnitudes encontrados pelo *starlight* para a galáxia UGC 12914.

5.5 Discussões gerais

Apresentamos na Tabela 5.4 os valores da taxa de formação estelar integrados para todo o cubo nas três galáxias, deduzidos a partir da síntese de população estelar, assim como a partir do fluxo da linha de Br γ . Também listamos os valores derivados a partir da síntese no óptico e do fluxo de H α .

Tabela 5.4 – Taxa de formação estelar em M_{\odot} /ano deduzida a partir da síntese de população estelar e a partir do fluxo da linha de Br γ .

Objeto	SFR(IR)	SFR(BR γ)	SFR(óptico)	SFR(H α)
UGC 00556	2.27	1.22	1.33	0.41
UGC 02982	25.93	2.28	28.8	2.11
UGC 12914	7.64	0.34		

Como encontrado para a amostra APO, os resultados para a síntese de população estelar no infravermelho tendem a superestimar a população jovem, compensando-o com um aumento no avermelhamento. Os valores encontrados pela síntese nos mapas para o avermelhamento são, em média, 4 vezes maiores que os mesmos valores encontrados através da razão de Pa β /Br γ , embora este fator permaneça constante ao longo do cubo. Isso explica porque os valores encontrados pela síntese para a SFR chegaram a ser duas ordens de grandeza maiores que os valores deduzidos pelo fluxo da linha de Br γ em algumas regiões.

Este quadro se repetiu para a síntese óptica da UGC 02982, a qual apresentou uma diferença de uma ordem de grandeza entre a taxa de formação estelar deduzida através da linha de H α e a síntese óptica. Atribuímos esta diferença à baixa quantidade de absorções estelares passíveis de ajuste, causando uma superestimativa tanto na população jovem quanto no avermelhamento.

Este resultado reflete a necessidade de bandas de absorções estelares intensas, fundamentais para um melhor ajuste da população estelar. Em todos os objetos com baixa resolução e bandas de absorção débeis, são observados altos valores de avermelhamento acompanhados de uma superestimativa na composição jovem da população.

Das três galáxias analisadas neste capítulo, todas possuem razões de linhas típicas de LINERs em algumas regiões. O mecanismo LINER das galáxias UGC 02982 e UGC 12914 está confinados a regiões centrais, podendo ser entendidos como causados por acreção de matéria por buracos negros em um limite sub-Eddington.

Já a UGC 00556 possui regiões LINER estendidas ao longo do campo de visão NIFS, compatíveis com ionização por estrelas pAGB, tendo o centro dominado por uma alta taxa de formação estelar.

Em todos os casos, foram encontradas taxas de formação estelar mais altas que as das galáxias ETGs da amostra APO, sugerindo que o excesso de luminosidade infravermelha é causado pelas intensas taxas de formação estelar encontradas em galáxias LIRGs.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A partir de dados inéditos divididos em duas amostras distintas de LINERs, uma pertencente à classe de ETGs, com espectros de dispersão cruzada, e outra pertencente à classe de LIRGs, com dados de espectrógrafos de campo integral, além de dados ópticos obtidos da literatura para algumas das galáxias das duas amostras, estudamos a fonte de ionização das linhas em LINERs, comparando as características destas galáxias entre si e procurando mapear as regiões LINERs na amostra espacialmente resolvida. Nossas principais conclusões foram:

i) Através do diagrama BPT da Figura 4.3, confirmamos a natureza LINER das galáxias NGC 4636, NGC 5966, NGC 6081 e NGC 6338.

ii) A população estelar encontrada no óptico para a amostra APO é predominantemente velha, com estrelas intermediárias contribuindo em luminosidade em proporções significativas na NGC 4636 e NGC 6338.

iii) Para estes mesmos objetos, a síntese de população estelar no infravermelho com o parâmetro de A_v livre encontrou populações predominantemente jovens e avermelhadas, contradizendo os resultados encontrados no óptico. Ao fixarmos o valor de A_v para o valor derivado no óptico, obtivemos para os mesmos objetos populações mais velhas e um valor menor de A_{dev} , demonstrando a degenerescência do método.

iv) Para os objetos nos quais foi possível fixar o valor de A_v no infravermelho, encontramos contribuições mais altas de populações intermediárias que no óptico, demonstrando a maior sensibilidade para esta população nesta região espectral, embora este resultado possa ser superestimado pela baixa qualidade dos modelos.

v) Mesmo com o valor de A_v fixo, a síntese de população estelar para a NGC 6338 encontrou populações incompatíveis com a população encontrada no óptico. Atribuímos este resultado ao baixo S/N próximo às bandas de CO, fundamentais no ajuste correto da população estelar.

vi) Para as galáxias da amostra APO com dados no óptico, a população estelar intermediária seria a fonte de ionização do gás, embora mecanismos adicionais não possam ser descartados.

vii) Para as duas galáxias da amostra de LIRGs com dados ópticos, verificamos que elas se localizam na área de objetos em transição do diagrama BPT, sendo provavelmente a formação estelar o fator responsável por sua alta luminosidade infravermelha.

viii) A LIRG UGC 00556 é dominada em seu núcleo por uma região de intensa formação estelar, situando-se próxima da região de formação estelar do diagrama de Colina et al. (2015). As demais regiões, por sua vez, situam-se na região de AGNs, sugerindo um mecanismo de excitação adicional, como estrelas pAGB. Esta galáxia também possui evidências de um *outflow*, com um pico na dispersão das linhas, chegando a 280 km/s na linha de [FeII] e 180 km/s nas demais linhas, coincidente com um aumento na taxa de formação estelar.

ix) A UGC 02982 é caracterizada por uma região nuclear com razões de H_2/Bry e $[FeII]/Bry$ características de LINERs, dominada por população estelar velha, com as demais regiões possuindo altas taxas de formação estelar, sugerindo uma região nuclear ionizada por acréscimo de matéria em um buraco negro super massivo e as demais regiões sendo ionizadas pela intensa formação estelar. Ressaltamos que a classificação LINER para esta fonte é inédita.

x) A UGC 12914 é uma galáxia com fortes linhas de emissão características de LINERs confinadas ao núcleo não resolvido, e linhas de H_2 que se estendem ao longo do campo de visão NIFS. Este resultado sugere um mecanismo LINER na região central ionizada por acréscimo de matéria à um buraco negro super massivo, com as demais regiões sendo ionizadas basicamente por população jovem.

xi) A partir de resultados inéditos, demonstramos a degenerescência do método de síntese de população estelar no NIR, o qual tende a superestimar valores de avermelhamento e taxa de formação estelar, embora este efeito seja reforçado pela baixa qualidade dos modelos. No entanto, o NIR ainda pode ser visto como um bom indicador de populações, com resultados coerentes entre si.

xii) Nosso trabalho sugere de fato diferentes mecanismos de ionização para objetos que são classificados ópticamente como LINERs. Através da análise simultânea de dados ópticos e NIR encontramos que o mecanismo LINER dominante em galáxias ETGs pode ser entendido como estrelas pAGB, enquanto que em galáxias LIRGs suas ionizações ocorram preferencialmente através de estrelas jovens e AGNs.

Ao longo deste trabalho, buscamos através de diversos métodos estudar a fonte de ionização central em galáxias classificadas como LINERs divididas em duas amostras, uma com espectros 1d de galáxias pertencentes à classe de ETGs e outra espacialmente resolvida de galáxias LIRGs.

Pretendemos estender as técnicas e procedimentos aplicados às galáxias espacialmente resolvidas, buscando mapear as regiões LINERs também em galáxias ETGs, com a finalidade de comparar os resultados obtidos para duas populações distintas de galáxias classificadas como LINERs. Além disto, temos também como perspectivas futuras estender estes métodos a outras galáxias LIRGs e, possivelmente, ULIRGs, obtendo assim um cenário físico melhor embasado do ponto de vista estatístico.

BIBLIOGRAFIA

ACCRETION AND EJECTION IN AGN: A GLOBAL VIEW. 22 a 26 de junho de 2009 em Como, Itália. *Atas*. Alexander, D. M.; Swinbank, A. M.; Smail, I.; McDermid, R.; Nesvadba, N. P. H. **Revealing an Energetic Galaxy-Wide Outflow in a $z \approx 2$ Ultraluminous Infrared Galaxy**. MNRAS, p.74, outubro/2010.

ARMUS, L.; HECKMAN, T.; MILEY, G.. Multicolor optical imaging of powerful far-infrared galaxies - More evidence for a link between galaxy mergers and far-infrared emission. **Astronomical Journal**, vol. 94, Oct. 1987, p. 831-846, outubro/1987.

ARMUS, L.; HECKMAN, T. M.; MILEY, G. K. The detection of Wolf-Rayet stars in a very powerful far-infrared galaxy - Direct evidence for a starburst. **Astrophysical Journal**, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 326, March 15, 1988, p. L45-L49, março/1988.

BALDWIN, J. A.; PHILLIPS, M. M.; TERLEVICH, R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. **Astronomical Society of the Pacific**, Publications, vol. 93, Feb.-Mar. 1981, p. 5-19, fevereiro/1981.

BAMFORD, S. P.; ROJAS, A. L.; NICHOL, R. C.; MILLER, C. J.; WASSERMAN, L.; GENOVESE, C. R.; FREEMAN, P. E. Revealing components of the galaxy population through non-parametric techniques. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 391, Issue 2, pp. 607-616, dezembro/2008.

BARTH, A. J.; FILIPPENKO, A. V.; MORAN, E. C. Polarized Broad H α Emission from the LINER Nucleus of NGC 1052. **The Astrophysical Journal**, Volume 515, Issue 2, pp. L61-L64, abril/1999.

BARTH, A. J.; SHIELDS, J. C. LINER/HII "Transition" Nuclei and the Nature of NGC 4569. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, Volume 112, Issue 772, pp. 753-767, junho/2000.

BARVAINIS, R.. Hot dust and the near-infrared bump in the continuum spectra of quasars and active galactic nuclei. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 320, Sept. 15, 1987, p. 537-544 setembro/1987.

BEICHMAN, C. A.; SOIFER, B. T.; HELOU, G.; CHESTER, T. J.; NEUGEBAUER, G.; GILLETT, F. C.; LOW, F. J. Discovery of an infrared-loud quasar. **Astrophysical Journal**, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 308, Sept. 1, 1986, p. L1-L5, setembro/1986.

BERTOLA, F.; BETTONI, D.; DANZIGER, J.; SADLER, E.; SPARKE, L.; DE ZEEUW, T.. Testing the gravitational field in elliptical galaxies - NGC 5077. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 373, June 1, 1991, p. 369-390, junho/1991.

BINETTE, L.; MAGRIS, C. G.; STASINSKA, G.; BRUZUAL, A. G. Photoionization in elliptical galaxies by old stars. **Astronomy and Astrophysics**, vol. 292, no. 1, p. 13-19, dezembro/1994.

BRUZUAL, G.; CHARLOT, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 344, Issue 4, pp. 1000-1028, outubro/2003.

CALZETTI, D.; ARMUS, LEE; BOHLIN, R. C.; KINNEY, A. L.; KOORNNEEF, J.; STORCHBERGMANN, T.. The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 533, Issue 2, pp. 682-695, abril/2000.

CACCIANIGA, A.; MARCHÃ, M. J.; ANTÓN, S.; MACK, K.-H.; NEESER, M. J. The CLASS blazar survey - II. Optical properties. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 329, Issue 4, pp. 877-889, fevereiro/2002.

CAPPELLARI, M.; EMSELLEM, E.. 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**, Volume 116, Issue 816, pp. 138-147, fevereiro/2004.

CARDELLI, J. A.; CLAYTON, G. C.; MATHIS, J. S. The relationship between IR, optical, and UV extinction. IAU Symposium No. 135: **Interstellar dust: contributed papers**, p. 5 - 10, dezembro/1989.

CLEMENTS, D. L.; SUTHERLAND, W. J.; MCMAHON, R. G.; SAUNDERS, W. Optical imaging of ultraluminous IRAS galaxies: how many are mergers? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 279, Issue 2, pp. 477-497, março/1996.

COLINA, LUIS; PIQUERAS LÓPEZ, JAVIER; ARRIBAS, SANTIAGO; RIFFEL, ROGÉRIO; RIFFEL, ROGEMAR A.; RODRIGUEZ-ARDILA, ALBERTO; PASTORIZA, MIRIANI; STORCHI-BERGMANN, THAISA; ALONSO-HERRERO, ALMUDENA; SALES, DINALVA. Understanding the two-dimensional ionization structure in luminous infrared galaxies. A near-IR integral field spectroscopy perspective. **Astronomy & Astrophysics**, Volume 578, id.A48, 19 pp, junho/2015.

CONDON, J. J.; HELOU, G.; SANDERS, D. B.; SOIFER, B. T. The 'Taffy' galaxies UGC 12914/5. **Astronomical Journal**, vol. 105, no. 5, p. 1730-1736, maio/1993.

CONTENT, ROBERT. New design for integral field spectroscopy with 8-m telescopes. **Proc. SPIE** Vol. 2871, p. 1295-1305, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, Arne L. Ardeberg; Ed, março/1997.

CUSHING, MICHAEL C.; VACCA, WILLIAM D.; RAYNER, JOHN T. Spextool: A Spectral Extraction Package for SpeX, a 0.8-5.5 Micron Cross-Dispersed Spectrograph. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, Volume 116, Issue 818, pp. 362-376, abril/2004.

DAMETTO, N. Z. **Investigando as populações estelares de galáxias Starburst através de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2014. 101p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DE GRIJP, M. H. K.; MILEY, G. K.; LUB, J.; DE JONG, T. Infrared Seyferts - A new population of active galaxies? **Nature**, vol. 314, March 21, 1985, p. 240-242, março/1985.

DOPITA, M. A.; SUTHERLAND, R. S. Spectral Signatures of Fast Shocks. II. Optical Diagnostic Diagrams. **Astrophysical Journal** v.455, p.468, dezembro/1995.

DRESSEL, L. L.; CONDON, J. J. The Arecibo 2380 MHz survey of bright galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, vol. 36, Jan. 1978, p. 53-75, janeiro/1978.

ELSTON, R.; CORNELL, M. E.; LEBOSKY, M. J. The properties of far-infrared luminous galaxies. I Spectroscopic and near-infrared observations. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 296, Sept. 1, 1985, p. 106-114, setembro/1985.

FERLAND, G. J.; NETZER, H. Are there any shock-heated galaxies. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 264, Jan. 1, 1983, p. 105-113, janeiro/1983.

FERNANDES, CID, ROBERTO; MATEUS, ABÍLIO; SODRÉ, LAERTE; STASINSKA, GRAZYNA; GOMES, JEAN M. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 358, Issue 2, pp. 363-378, abril/2005.

FERRARESE, LAURA; MERRITT, DAVID. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 539, Issue 1, pp. L9-L12, agosto/2000.

FILIPPENKO, A. V. LINERs and their Physical Mechanisms. **Active Galactic Nuclei: from Central Engine to Host Galaxy**, meeting held in Meudon, France, July 23-27, 2002, Eds.: S. Collin, F. Combes and I. Shlosman. ASP (Astronomical Society of the Pacific), Conference Series, Vol. 290, p. 369, 2003.

FILIPPENKO, A. V.; HALPERN, J. P. NGC 7213 - A key to the nature of liners? **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 285, Oct. 15, 1984, p. 458-474, outubro/1984.

FORBES, D. A.; WARD, M. J.; ROTACIUC, V.; BLIETZ, M.; GENZEL, R.; DRAPATZ, S.; VAN DER WERF, P. P.; KRABBE, A. High-resolution imaging of forbidden Fe II 1.64 microns, Brackett-gamma, and H2 1-0 S(1) emission in the starburst galaxy NGC 253. **Astrophysical Journal**, Part 2 - Letters (ISSN 0004-637X), vol. 406, no. 1, p. L11-L14, março/1993.

FORD, HOLLAND C.; HARMS, RICHARD J.; TSVETANOV, ZLATAN I.; HARTIG, GEORGE F.; DRESSEL, LINDA L.; KRISS, GERARD A.; BOHLIN, RALPH C.; DAVIDSEN, ARTHUR F.; MARGON, BRUCE; KOCHHAR, AJAY K. Narrowband HST images of M87: Evidence for a disk of ionized gas around a massive black hole. **Astrophysical Journal**, Part 2 - Letters, vol. 435, no. 1, p. L27-L30, novembro/1994.

FORMAN, W.; JONES, C.; TUCKER, W. Hot coronae around early-type galaxies. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 293, p. 102-119, junho/1985.

GARCIA, A. M. General study of group membership. II - Determination of nearby groups. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, vol. 100, no. 1, p. 47-90, julho/1993.

GEBHARDT, KARL; BENDER, RALF; BOWER, GARY; DRESSLER, ALAN; FABER, S. M.; FILIPPENKO, ALEXEI V.; GREEN, RICHARD; GRILLMAIR, CARL; HO, LUIS C.; KORMENDY, JOHN; LAUER, TOD R.; MAGORRIAN, JOHN; PINKNEY, JASON; RICHSTONE, DOUGLAS; TREMAINE, SCOTT. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. **The Astrophysical Journal**, Volume 539, Issue 1, pp. L13-L16, agosto/2000.

GIRARDI, LEO; BERTELLI, GIANPAOLO. The evolution of the V-K colours of single stellar populations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 300, Issue 2, pp. 533-549, outubro/1998.

GONZÁLEZ DELGADO, R. M.; PÉREZ, E.; CID FERNANDES, R.; GARCÍA-BENITO, R.; DE AMORIM, A. L.; SÁNCHEZ, S. F.; HUSEMANN, B.; CORTIJO-FERRERO, C.; LÓPEZ FERNÁNDEZ, R.; SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P.; BEKERAITE, S.; WALCHER, C. J.; FALCÓN-BARROSO, J.; GALLAZZI, A.; VAN DE VEN, G.; ALVES, J.; BLAND-HAWTHORN, J.; KENNICUTT, R. C.; KUPKO, D.; LYUBENOVA, M.; MAST, D.; MOLLÁ, M.; MARINO, R. A.; QUIRRENBACH, A.; VÍLCHEZ, J. M.; WISOTZKI, L. The star formation history of CALIFA galaxies: Radial structures. **Astronomy & Astrophysics**, Volume 562, id.A47, 25 pp, fevereiro/2014.

HALPERN, J. P.; STEINER, J. E. Low-ionization active galactic nuclei - X-ray or shock heated? **Astrophysical Journal**, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 269, June 15, 1983, p. L37-L41, junho/1983.

HARMS, RICHARD J.; FORD, HOLLAND C.; TSVETANOV, ZLATAN I.; HARTIG, GEORGE F.; DRESSEL, LINDA L.; KRISS, GERARD A.; BOHLIN, RALPH; DAVIDSEN, ARTHUR F.; MARGON, BRUCE; KOCHHAR, AJAY K. HST FOS spectroscopy of M87: Evidence for a disk of ionized gas around a massive black hole. **Astrophysical Journal**, Part 2 - Letters, vol. 435, no. 1, p. L35-L38, novembro/1994.

HECKMAN, T. M. An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, vol. 87, no. 1-2, July 1980, p. 152-164, junho/1980.

HECKMAN, T. M.; ARMUS, L.; MILEY, G. K. Evidence for large-scale winds from starburst galaxies. II - an optical investigation of powerful far-infrared galaxies. **Astronomical Journal**, vol. 93, Feb. 1987, p. 276-283, fevereiro/1987.

HO, LUIS C.; FILIPPENKO, ALEXEI V.; SARGENT, WALLACE L. W. A Reevaluation of the Excitation Mechanism of LINERs. **Astrophysical Journal** v.417, p.63, novembro/1993

HO, LUIS C.; FILIPPENKO, ALEXEI V.; SARGENT, WALLACE L. W.; PENG, CHIEN Y. A Search for "Dwarf" Seyfert Nuclei. IV. Nuclei with Broad H α Emission. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, Volume 112, Issue 2, pp. 391-414, outubro/1997.

HO, LUIS C. Nuclear Activity in Nearby Galaxies. **Annual Review of Astronomy & Astrophysics**, vol. 46, Issue 1, pp.475-539, setembro/2008.

HUTCHINGS, J. B.; NEFF, S. G. Evolution of luminous IRAS sources - CCD imaging. **Astronomical Journal**, vol. 101, Feb. 1991, p. 434-446, fevereiro/1991.

JONES, C.; FORMAN, W.; VIKHLININ, A.; MARKEVITCH, M.; DAVID, L.; WARMFLASH, A.; MURRAY, S.; NULSEN, P. E. J. Chandra Observations of NGC 4636-an Elliptical Galaxy in Turmoil. **The Astrophysical Journal**, Volume 567, Issue 2, pp. L115-L118, março/2002.

KLEINMANN, D. E.; LOW, F. J. Observations of Infrared Galaxies. **Astrophysical Journal**, vol. 159, p.L165, março/1970.

KIM, D.-C.; VEILLEUX, SYLVAIN; SANDERS, D. B. The IRAS 1 Jy Sample of Ultraluminous Infrared Galaxies. II. Optical Spectroscopy. **The Astrophysical Journal**, Volume 508, Issue 2, pp. 627-647, dezembro/1998.

VEILLEUX, SYLVAIN; KIM, D.-C.; SANDERS, D. B. Optical Spectroscopy of the IRAS 1 JY Sample of Ultraluminous Infrared Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 522, Issue 1, pp. 113-138, setembro/1999.

KARACHENTSEVA, V. E. The Catalogue of Isolated Galaxies. **Astrof. Issledovanija Byu. Spec. Ast. Obs.**; Vol. 8; Page 3-49, 1973.

KIM, D.-C.; SANDERS, D. B.; VEILLEUX, S.; MAZZARELLA, J. M.; SOIFER, B. T. Optical Spectroscopy of Luminous Infrared Galaxies. I. Nuclear Data. **Astrophysical Journal Supplement** v.98, p.129, maio/1995.

KEHRIG, C.; MONREAL-IBERO, A.; PAPADEROS, P.; VÍLCHEZ, J. M.; GOMES, J. M.; MASEGOSA, J.; SÁNCHEZ, S. F.; LEHNERT, M. D.; CID FERNANDES, R.; BLAND-HAWTHORN, J.; BOMANS, D. J.; MARQUEZ, I.; MAST, D.; AGUERRI, J. A. L.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, Á. R.; MARINO, R. A.; PASQUALI, A.; PEREZ, I.; ROTH, M. M.; SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P.; ZIEGLER, B. The ionized gas in the CALIFA early-type galaxies. I. Mapping two representative cases: NGC 6762 and NGC 5966. **Astronomy & Astrophysics**, Volume 540, id.A11, 15 pp, 04/2012.

KENNICUTT, ROBERT C., JR. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, Volume 36, 1998, pp. 189-232, 1998.

KENNICUTT, ROBERT C., JR.; Tamblyn, Peter; Congdon, Charles E. Past and future star formation in disk galaxies. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 435, no. 1, p. 22-36, novembro/1994.

KHACHIKIAN, E. Y.; WEEDMAN, D. W. An atlas of Seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, vol. 192, Sept. 15, 1974, pt. 1, p. 581-589, setembro/1974.

KOTILAINEN, J. K.; HYVÖNEN, T.; REUNANEN, J.; IVANOV, V. D. Near-infrared spectroscopy of stellar populations in nearby spiral galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 425, Issue 2, pp. 1057-1067, setembro/2012.

LAWRENCE, A.; ROWAN-ROBINSON, M.; LEECH, K.; JONES, D. H. P.; WALL, J. V. High-luminosity IRAS galaxies. I - The proportion of IRAS galaxies in interacting systems. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, vol. 240, Sept. 15, 1989, p. 329-348, setembro/1989.

LEECH, K. J.; ROWAN-ROBINSON, M.; LAWRENCE, A.; HUGHES, J. D. Optical structure of a large sample of ultraluminous IRAS galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, vol. 267, no. 2, p. 253-269, março/1994.

LIDE (Editor-in-Chief). **CRC Handbook of Chemistry and Physics**, 85th Edition. USA: CRC Press, June 11, 2004. 2656p.

LONSDALE, C. J.; FARRAH, D.; SMITH, H. E. Ultraluminous Infrared Galaxies. **Astrophysics Update 2, Springer Praxis Books**, p. 285. 2006.

LOUBSER, S. I.; SOECHTING, I. K. The detailed nature of active central cluster galaxies. **Proceedings of the International Astronomical Union**, Volume 292, pp. 158-158, março/2013.

LOW, J.; KLEINMANN, D. E. Proceedings of the Conference on Seyfert Galaxies and Related Objects: 17. Infrared Observations of Seyfert Galaxies, Quasistellar Sources, and Planetary Nebulae. **Astronomical Journal**, Vol. 73, p. 868, novembro/1968.

LU, Y., ZHENG, Z., ZHANG, S. N., & HUANG, Y. F. On the Nature of the Flares from Three Candidate Tidal Disruption Events. **The Central Engine of Active Galactic Nuclei, ASP Conference Series**, Vol. 373, proceedings of the conference held 16-21 October, 2006 at Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China.

MADAU, PIERO; POZZETTI, LUCIA; DICKINSON, MARK. The Star Formation History of Field Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 498, Issue 1, pp. 106-116, maio/1998.

MAOZ, DAN; KORATKAR, ANURADHA; SHIELDS, JOSEPH C.; HO, LUIS C.; FILIPPENKO, ALEXEI V.; STERNBERG, AMIEL. The Ultraviolet Spectra of LINERs: A Comparative Study. **The Astronomical Journal**, Volume 116, Issue 1, pp. 55-67, julho/1998.

MARASTON, CLAUDIA. Evolutionary population synthesis: models, analysis of the ingredients and application to high-z galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 362, Issue 3, pp. 799-825, setembro/2005.

MARASTON, CLAUDIA. Evolutionary synthesis of stellar populations: a modular tool. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 300, Issue 3, pp. 872-892, novembro/1998.

MARTEL, A. R.; FORD, H. C.; BRADLEY, L. D.; TRAN, H. D.; MENANTEAU, F.; TSVETANOV, Z. I.; ILLINGWORTH, G. D.; HARTIG, G. F.; CLAMPIN, M. Dust and Ionized Gas in Nine Nearby Early-Type Galaxies Imaged with the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys. **The Astronomical Journal**, Volume 128, Issue 6, pp. 2758-2771, dezembro/2004.

MARTINS, L. P.; LANFRANCHI, G.; GONÇALVES, D. R.; MAGRINI, L.; TEODORESCU, A. M.; QUIREZA, C. The ionization mechanism of NGC 185: how to fake a Seyfert galaxy? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 419, Issue 4, pp. 3159-3166, fevereiro/2012.

MCGREGOR, PETER J.; HART, JOHN; CONROY, PETER G.; PFITZNER, MURRAY L.; BLOXHAM, GABE J.; JONES, DAMIEN J.; DOWNING, MARK D.; DAWSON, MURRAY; YOUNG, PETER; JARNYK, MARK; VAN HARMELEN, JAN. Gemini near-infrared integral field spectrograph (NIFS). **Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes**. Proceedings of the SPIE, Volume 4841, pp. 1581-1591, março/2003.

MEDLING, ANNE M.; U, VIVIAN; GUEDES, JAVIERA; MAX, CLAIRE E.; MAYER, LUCIO; ARMUS, LEE; HOLDEN, BRADFORD; ROSKAR, ROK; SANDERS, DAVID. Stellar and Gaseous Nuclear Disks Observed in Nearby (U)LIRGs. **The Astrophysical Journal**, Volume 784, Issue 1, article id. 70, 31 pp. (2014), março/2014.

MELNICK, J.; MIRABEL, I. F. NTT images of ultraluminous infrared galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, vol. 231, no. 2, May 1990, p. L19-L22, maio/1990.

MENEZES, R. B.; STEINER, J. E.; RICCI, T. V. A treatment procedure for Gemini North/NIFS data cubes: application to NGC 4151. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 438, Issue 3, p.2597-2620, março/2014.

NAAB, THORSTEN; BURKERT, ANDREAS. Statistical Properties of Collisionless Equal- and Unequal-Mass Merger Remnants of Disk Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 597, Issue 2, pp. 893-906, novembro/2003.

NILSON, P. **Uppsala general catalogue of galaxies**, 1973, Acta Universitatis Upsalienis, Nova Regiae Societatis Upsaliensis, Series v: a

O'CONNELL, R. W.; DRESSEL, L. L. Incidence of ionised gas in E/S0 radio galaxies. **Nature**, vol. 276, Nov. 23, 1978, p. 374, 375, novembro/1978.

OLIVA, E.; ORIGLIA, L.; KOTILAINEN, J. K.; MOORWOOD, A. F. M. Red supergiants as starburst tracers in galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v.301, p.55, setembro/1995.

ORIGLIA, L.; OLIVA, E. Is the [CO] index an age indicator for star forming galaxies? **Astronomy and Astrophysics**, v.357, p.61-65, maio/2000.

OSTERBROCK, D. E.; DE ROBERTIS, M. M. Optical spectra of IRAS 'warm' galaxies. **Astronomical Society of the Pacific**, Publications, vol. 97, Dec. 1985, p. 1129-1141, dezembro/1985.

PANDGE, M. B.; VAGSHETTE, N. D.; DAVID, L. P.; PATIL, M. K. Systematic study of X-ray cavities in the brightest galaxy in the Draco constellation NGC 6338. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 421, Issue 1, pp. 808-817, março/2012.

PLANCK COLLABORATION. Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results. **Astronomy & Astrophysics**, Volume 571, id.A1, 48 pp, novembro/2014.

PHILLIPS, M. M. Optical Spectrophotometry of the Suspected X-Ray Galaxies NGC 6221 and NGC 7213. **Astrophysical Journal Letters** v.227, p.L121, fevereiro/1979.

PINTO, CIRO; FABIAN, ANDREW C.; WERNER, NORBERT; KOSEC, PETER; AHORANTA, JUSSI; DE PLAA, JELLE; KAASTRA, JELLE S.; SANDERS, JEREMY S.; ZHANG, YU-YING; FINOGUENOV, ALEXIS. Discovery of O VII line emitting gas in elliptical galaxies. **Astronomy & Astrophysics**, Volume 572, id.L8, 4 pp, dezembro/2014.

RAICHUR, H.; DAS, M.; HERRERO, A. ALONSO; SHASTRI, P.; KANTHARIA, N. G. Late time X-ray, IR and radio observations of the tidal disruption event galaxy NGC 5905. **Astrophysics and Space Science**, Volume 357, Issue 1, article id.32 11pp, maio/2015.

RENZINI, A. In: GALAXY FORMATION, Silk, J., Vittorio, J., editores, Amsterdam: North Holland, p. 303, 1981.

RICCI, T. V.; STEINER, J. E.; MENEZES, R. B. Integral field unit spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - I. Principal component analysis Tomography and nuclear activity. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 440, Issue 3, p.2419-2441, maio/2014.

RICCI, T. V.; STEINER, J. E.; MENEZES, R. B. IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - II. Nuclear emission line properties. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 440, Issue 3, p.2442-2456, maio/2014.

RICCI, T. V.; STEINER, J. E.; MENEZES, R. B. IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - III. Properties of the circumnuclear gas emission. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 451, Issue 4, p.3728-3758, agosto/2015.

RIEKE, G. H.; LEBOSKY, M. J. The luminosity function for field galaxies in the infrared. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 304, May 1, 1986, p. 326-333, maio/1986.

RIEKE, G. H.; LOW, F. J. Infrared Photometry of Extragalactic Sources. **Astrophysical Journal**, vol. 176, p.L95, setembro/1972.

RIFFEL, ROGEMAR A.; STORCHI-BERGMANN, THAISA; DORS, OLI L.; WINGE, CLÁUDIA. AGN-starburst connection in NGC7582: Gemini near-infrared spectrograph integral field unit observations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 393, Issue 3, pp. 783-797, março/2009.

RIFFEL, ROGEMAR A.; STORCHI-BERGMANN, T.; WINGE, C.. Feeding versus feedback in AGNs from near-infrared IFU observations: the case of Mrk 79. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 430, Issue 3, p.2249-2261, abril/2013.

RIFFEL, ROGÉRIO.; PASTORIZA, M. G.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; BONATTO, C. Probing the near-infrared stellar population of Seyfert galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 400, Issue 1, pp. 273-290, novembro/2009.

RIFFEL, ROGÉRIO.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; ALEMAN, I.; BROTHERTON, M. S.; PASTORIZA, M. G.; BONATTO, C.; DORS, O. L. Molecular hydrogen and [Fe II] in active galactic nuclei - III. Low-ionization nuclear emission-line region and star-forming galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 430, Issue 3, p.2002-2017, abril/2013.

RÖCK, B.; VAZDEKIS, A.; PELETIER, R. F.; KNAPEN, J. H.; FALCÓN-BARROSO, J. Stellar population synthesis models between 2.5 and 5 μm based on the empirical IRTF stellar library. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 449, Issue 3, p.2853-2874, maio/2015.

ROBERTSON, BRANT; BULLOCK, JAMES S.; COX, THOMAS J.; DI MATTEO, TIZIANA; HERNQUIST, LARS; SPRINGEL, VOLKER; YOSHIDA, NAOKI. A Merger-driven Scenario for Cosmological Disk Galaxy Formation. **The Astrophysical Journal**, Volume 645, Issue 2, pp. 986-1000, julho/2006.

ROBITAILLE, T. P.; WHITNEY, B. A. The Present-Day Star Formation Rate of the Milky Way Determined from Spitzer-Detected Young Stellar Objects. **The Astrophysical Journal Letters**, Volume 710, Issue 1, pp. L11-L15, fevereiro/2010.

RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; PASTORIZA, M. G.; VIEGAS, S.; SIGUT, T. A. A.; PRADHAN, A. K. Molecular hydrogen and [Fe II] in Active Galactic Nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v.425, p.457-474, outubro/2004.

RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; MAZZALAY, X. The near-infrared spectrum of Mrk 1239: direct evidence of the dusty torus? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**: Letters, Volume 367, Issue 1, pp. L57-L61, março/2006.

RUPKE, DAVID S.; VEILLEUX, SYLVAIN; SANDERS, D. B. Keck Absorption-Line Spectroscopy of Galactic Winds in Ultraluminous Infrared Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 570, Issue 2, pp. 588-609, maio/2002.

SANDERS, D. B.; MIRABEL, I. F. Luminous Infrared Galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, Volume 34, 1996, pp. 749, 1996.

SANDERS, D. B.; MAZZARELLA, J. M.; KIM, D.-C.; SURACE, J. A.; SOIFER, B. T. The IRAS Revised Bright Galaxy Sample. **The Astronomical Journal**, Volume 126, Issue 4, pp. 1607-1664, outubro/2003.

SCHMIDT, ALEX A.; COPETTI, MARCUS V. F.; ALLOIN, DANIELLE; JABLONKA, PASCALE. Population synthesis methods - Discussion and tests on the solution uniqueness. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, vol. 249, April 15, 1991, p. 766-778, abril/1991.

SCHÖNELL JÚNIOR, A. J. **A distribuição e cinemática do gás em mrk 766 vistas em detalhes a partir de observações no infravermelho**. 2013. 73p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SCHMITT, H. R.; CALZETTI, D.; ARMUS, L.; GIAVALISCO, M.; HECKMAN, T. M.; KENNICUTT, R. C., JR.; LEITHERER, C.; MEURER, G. R. Multiwavelength Star Formation Indicators: Observations. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, Volume 164, Issue 1, pp. 52-80, maio/2006.

SERLEMITOSOS, P.; PTAK, A.; YAQOOB, T. X-Ray Observations of LINER and Starburst Galaxies. The Physics of Liners in view of recent observations. **ASP Conference Series**; Vol. 103; 1996; ed. M. Eracleous; A. Koratkar; C. Leitherer; and L. Ho (1996), p.70, 1996.

SEYFERT, CARL K. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. **Astrophysical Journal**, vol. 97, p.28, janeiro/1943.

SHIELDS, GREGORY A. A Brief History of Active Galactic Nuclei. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, Volume 111, Issue 760, pp. 661-678, junho/1999.

SHIH, H.-Y.; RUPKE, D. S. N. The Complex Structure of the Multi-phase Galactic Wind in a Starburst Merger. **The Astrophysical Journal**, Volume 724, Issue 2, pp. 1430-1440, dezembro/2010.

SIMPSON, C.; FORBES, D. A.; BAKER, A. C.; WARD, M. J. Forbidden Fe⁺ emission from active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 283, Issue 3, pp. 777-797, dezembro/1996.

SINGH, R.; VAN DE VEN, G.; JAHNKE, K.; LYUBENOVA, M.; FALCÓN-BARROSO, J.; ALVES, J.; CID FERNANDES, R.; GALBANY, L.; GARCÍA-BENITO, R.; HUSEMANN, B.; KENNICUTT, R. C.; MARINO, R. A.; MÁRQUEZ, I.; MASEGOSA, J.; MAST, D.; PASQUALI, A.; SÁNCHEZ, S. F.; WALCHER, J.; WILD, V.; WISOTZKI, L.; ZIEGLER, B. The nature of LINER galaxies:. Ubiquitous hot old stars and rare accreting black holes. **Astronomy & Astrophysics**, Volume 558, id.A43, 8 pp, outubro/2013.

SOIFER, B. T.; ROWAN-ROBINSON, M.; HOUCK, J. R.; DE JONG, T.; NEUGEBAUER, G.; AUMANN, H. H.; BEICHMAN, C. A.; BOGGESS, N.; CLEGG, P. E.; EMERSON, J. P.; GILLET, F. C.; HABING, H. J.; HAUSER, M. G.; LOW, F. J.; MILEY, G.; YOUNG, E. Infrared galaxies in the IRAS minisurvey. **Astrophysical Journal**, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 278, March 1, 1984, p. L71-L74, março/1984.

SOIFER, B. T.; SANDERS, D. B.; MADORE, B. F.; NEUGEBAUER, G.; DANIELSON, G. E.; ELIAS, J. H.; LONSDALE, CAROL J.; RICE, W. L. The IRAS bright galaxy sample. II - The sample and luminosity function. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 320, p. 238-257, setembro/1987.

SPRINGEL, V.; HERNQUIST, L.. Formation of a Spiral Galaxy in a Major Merger. **The Astrophysical Journal**, Volume 622, Issue 1, pp. L9-L12, março/2005.

STANGER, V. J.; WARWICK, R. S. High-resolution X-ray and radio observations of the giant elliptical galaxies NGC 4636 and 4649. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, vol. 220, May 15, 1986, p. 363-376, maio/1986.

STORCHI-BERGMANN, T.; MCGREGOR, P. J.; RIFFEL, ROGEMAR A.; SIMÕES LOPES, R.; BECK, T.; DOPITA, M. Feeding versus feedback in NGC4151 probed with Gemini NIFS - I. Excitation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 394, Issue 3, pp. 1148-1166, abril/2009.

STURM, E.; RUPKE, D.; CONTURSI, A.; KIM, D.-C.; LUTZ, D.; NETZER, H.; VEILLEUX, S.; GENZEL, R.; LEHNERT, M.; TACCONI, L. J.; MAOZ, D.; MAZZARELLA, J.; LORD, S.; SANDERS, D.; STERNBERG, A. Mid-Infrared Diagnostics of LINERS. **The Astrophysical Journal**, Volume 653, Issue 1, pp. L13-L16, dezembro/2006.

SUDA, TAKUMA; HIRSCHI, RAPHAEL; FUJIMOTO, MASAYUKI Y. Stellar Evolution Constraints on the Triple-alpha Reaction Rate. **The Astrophysical Journal**, Volume 741, Issue 1, article id. 61, 8 pp, novembro/2011.

SURACE, JASON A.; SANDERS, D. B.; VACCA, WILLIAM D.; VEILLEUX, SYLVAIN; MAZZARELLA, J. M. HST/WFPC2 Observations of Warm Ultraluminous Infrared Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 492, Issue 1, pp. 116-136, janeiro/1998.

TAN, J. C.; BLACKMAN, E. G. Star-forming accretion flows and the low-luminosity nuclei of giant elliptical galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 362, Issue 3, pp. 983-994, setembro/2005.

THOMAS, H. C.; DUNNE, L.; GREEN, D. A.; CLEMENS, M. S.; ALEXANDER, P.; EALES, S. The distribution of atomic gas and dust in nearby galaxies - II. Further matched-resolution Very Large Array H I and SCUBA 850- μ m images. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 348, Issue 4, pp. 1197-1207, março/2004.

URRY, C. M.; PADOVANI, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v.107, p.803, setembro/1995.

VACCA, W. D.; CUSHING, M. C.; RAYNER, J. T. A Method of Correcting Near-Infrared Spectra for Telluric Absorption. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, Volume 115, Issue 805, pp. 389-409, março/2003.

VEILLEUX, S.; SANDERS, D. B.; KIM, D.-C. A Near-Infrared Search for Hidden Broad-Line Regions in Ultraluminous Infrared Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 484, Issue 1, pp. 92-107, julho/1997.

VEILLEUX, S.; SANDERS, D. B.; KIM, D.-C. New Results from a Near-Infrared Search for Hidden Broad-Line Regions in Ultraluminous Infrared Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 522, Issue 1, pp. 139-156, setembro/1999.

VÉRON-CETTY, M.-P.; VÉRON, P. A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition. **Astronomy and Astrophysics**, Volume 455, Issue 2, August IV 2006, pp.773-777, agosto/2006.

WESTMOQUETTE, M. S.; CLEMENTS, D. L.; BENDO, G. J.; KHAN, S. A. Spatially resolved observations of warm ionized gas and feedback in local ULIRGs. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 424, Issue 1, pp. 416-456, julho/2012.

WILMAN, R. J.; CRAWFORD, C. S.; ABRAHAM, R. G. Mapping the gas kinematics and ionization structure of four ultraluminous IRAS galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 309, Issue 2, pp. 299-324, outubro/1999.

WILSON, J. C.; HENDERSON, C. P.; HERTER, T. L.; MATTHEWS, K.; SKRUTSKIE, M. F.; ADAMS, J. D.; MOON, D. S.; SMITH, R.; GAUTIER, N.; RESSLER, M.; SOIFER, B. T.; LIN, S.; HOWARD, J.; LAMARR, J.; STOLBERG, T. M.; ZINK, J. Mass producing an efficient NIR spectrograph. Ground-based Instrumentation for Astronomy.. **Proceedings of the SPIE**, Volume 5492, pp. 1295-1305, setembro/2004.

WINKLER, H. Line, LINER, linest - from micro-AGN to ultra-luminous LINERs. One and the same? eprint [arXiv:1409.2966](https://arxiv.org/abs/1409.2966), setembro/2014.

WROBEL, J. M.; HEESCHEN, D. S. Compact-core-dominated radio emission from bright E/S0 galaxies. **Astrophysical Journal**, Part 1, vol. 287, Dec. 1, 1984, p. 41-65, dezembro/1984.

YAN, R.; BLANTON, M. R. The Nature of LINER-like Emission in Red Galaxies. **The Astrophysical Journal**, Volume 747, Issue 1, article id. 61, 25 pp, março/2012.

ZIER, C.; BIERMANN, P. L. Binary black holes and tori in AGN. II. Can stellar winds constitute a dusty torus? **Astronomy and Astrophysics**, v.396, p.91-108, dezembro/2002.

ZOU, Z.; XIA, X.; DENG, Z.; SU, H.. The proportion of ultraluminous IRAS galaxies in interacting systems. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, vol. 252, Oct. 15, 1991, p. 593-599, outubro/1991.