



Universidade Estadual de Feira de Santana
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

Contribuições ao Estudo de Galáxias Peculiares com Jatos

Antonio Queiroz da Silva Neto

Feira de Santana

2019



Universidade Estadual de Feira de Santana
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

Antonio Queiroz da Silva Neto

Contribuições ao Estudo de Galáxias Peculiares com Jatos

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Feira de Santana como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César da Rocha Poppe

Feira de Santana

2019

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

S578c Silva Neto, Antonio Queiroz da
Contribuições ao estudo de galáxias peculiares com jatos / Antonio
Queiroz da Silva Neto.- Feira de Santana, 2019.

87 f.: il

Orientador: Paulo César da Rocha Poppe
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana,
Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, 2019.

1. Galáxias - Astronomia. 2. Galáxias – Categoria 7. 3. Galáxias
peculiares – Jatos. I. Poppe, Paulo César da Rocha, orient. II.
Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 524.6: 52

Tatiane Souza Santos - Bibliotecária CRB5/1634

Antonio Queiroz da Silva Neto

CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DE GALÁXIAS PECULIARES COM JATOS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Feira de Santana como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Feira de Santana, 04 de fevereiro de 2019

BANCA EXAMINADORA

PeMa
Dr. Paulo César da Rocha Poppe (Orientador)
Universidade Estadual de Feira de Santana

Max F. Abans
Dr. Max Faúndez-Abans
LNA–Laboratório Nacional de Astrofísica - MCTIC

Mirco Ragni
Dr. Mirco Ragni
Universidade Estadual de Feira de Santana

Abstract

This work aims to contribute to the knowledge of Category 7 ("Galaxies with Jets") in the Arp Madore Catalog of Peculiar Galaxies ("A Catalog of Southern Peculiar Galaxies and Association, 1987"). In particular, (E) similar to elliptic (E-like), spiral (S), other types (X), and companions (C), present a peculiar peculiar physical process (jets) which is not yet fully understood for the objects assembled in this Category. Therefore, in order to promote this discussion, we gathered from the literature a set of photometric data (in several spectral bands) and spectroscopic (in the optical), where we infer some correlations of color and nuclear activity for the sample. Spectroscopic data from were also obtained for some objects in the OPD/LNA-MCTIC. However, since the original observations made by Arp Madore were obtained with photographic plates, we decided to punctuate some criteria that would guarantee if, in fact, the cataloged objects had jets or if they were other characteristic that they resemble jets. Or, if they were peculiarities like tails, ties of matter and / or debris, which are included in Category 15 of the Catalog. The 125 final spectra obtained, 52 with absorption lines and 73 with emission lines, were analyzed with the STARLIGHT code of spectral synthesis, which provided a vector containing the stellar populations present, as well as the ages and metallicities. Although these spectra do not contain information of the jets (weak in their large majority), we have obtained some preliminary analyzes based on current knowledge about the relativistic jets emissions present in radiogalaxies. Like the possible physical processes that can characterize the peculiarities observed in Arp Madore objects come from collision-type gravitational interactions, fusion, or tide, we believe that the black holes thus formed and that inhabit the center of these objects also represent a key mechanism to explain the presence of the observed jets, but with the proviso that they accrete gas in the vicinity at low accretion rates. Finally, in order to keep the discussion of this work, a Web platform was constructed with all the information and data of this dissertation. Photometric and spectroscopic contributions may be fed by external researchers who have an interest in understanding the peculiar nature of these objects.

Keywords: Peculiar Galaxies. Jets. Spectral Synthesis. Data Reduction.

Resumo

Este trabalho objetiva contribuir para o conhecimento da Categoria 7 (”*Galaxies with Jets*”) presente no Catálogo Arp & Madore de Galáxias Peculiares (”*A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Association, 1987*”). Em particular, os objetos que fazem parte desta Categoria, i.e., as galáxias elípticas (E), semelhantes à elípticas (E-like), espirais (S), de outros tipos (X) e companheiras (C), apresentam um importante processo físico peculiar (jatos) que ainda não está totalmente compreendido para os objetos reunidos nesta Categoria. Portanto, para fomentar esta discussão, reunimos da literatura um conjunto de dados fotométricos (em diversas bandas espectrais) e espectroscópicos (no óptico), onde inferimos algumas correlações de cor e de atividade nuclear para amostra. Dados espectroscópicos de fenda longa foram também obtidos para alguns objetos no OPD/LNA-MCTIC. Porém como as observações originais realizadas por Arp & Madore foram obtidas com placas fotográficas, resolvemos pontuar alguns critérios que permitissem garantir se, de fato, os objetos catalogados possuíam jatos ou se eram outras característica que se assemelham a jatos. Ou, ainda, se eram peculiaridades como caudas, laços de matéria e/ou detritos, os quais integram a Categoria 15 do Catálogo. Os 125 espectros finais obtidos, 52 com linhas de absorção e 73 com linhas de emissão, foram analisados com o código STARLIGHT de síntese espectral, o qual forneceu um vetor contendo as populações estelares presentes, assim como as idades e as metalicidades. Apesar destes espectros não conterem informações dos jatos (fracos em sua grande maioria), obtivemos algumas análises preliminares baseadas nos atuais conhecimentos sobre as emissões de jatos relativísticos presentes em radiogaláxias. Como os possíveis processos físicos que podem caracterizar as peculiaridades observadas nos objetos Arp & Madore são oriundos de interações gravitacionais do tipo colisão, fusão ou maré, acreditamos que os buracos negros assim formados e que habitam o centro destes objetos também representam um mecanismo chave para explicar a presença dos jatos observados, mas com a ressalva que estes acretam o gás na vizinhança a baixas taxas de acreção. Finalmente, com o propósito de manter viva a discussão deste trabalho, uma plataforma Web foi construída com todas as informações e dados desta dissertação. Contribuições fotométricas e espectroscópicas podem ser alimentadas por pesquisadores externos que tenham o interesse em compreender a natureza peculiar desses objetos.

Palavras-chave: Galáxias Peculiares. Jatos. Síntese Espectral. Redução de Dados.

Prefácio

Esta dissertação de mestrado foi submetida à Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada.

A dissertação foi desenvolvido dentro do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PGCA) tendo como orientador o Dr. Prof. **Paulo César da Rocha Poppe** do Departamento de Física.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus que permitiu esta oportunidade, me guiando, capacitando, esclarecendo o caminho e tranquilizando nos momentos de dificuldade. Agradeço a Ele também por dar condições a minha família para me manter nas dificuldades no período em que estive dedicado ao curso do mestrado.

Aos meus pais por sempre me proporcionar o melhor mesmo em momentos de dificuldade, me incentivando aos estudos de forma incansável.

Ao Prof. Dr. Paulo César da Rocha Poppe, pelas orientações, discussões e aprendizado durante este período. Agradeço também pela paciência que durante o período do mestrado percebeu minhas dificuldades permitindo meu crescimento.

Aos amigos Regivaldo Ferreira, Felipe Pains, Priscila Cavalvante, Adriana Nery pela grande amizade que de forma fraterna ajudaram e fizeram parte dessa caminhada. Ao colega Jeziel Lago pela assistência e apoio na parte de programação se tornando importante coadjuvante desta caminha.

A todos os outros amigos e colegas, por ter me auxiliado de alguma maneira no desenvolvimento deste projeto.

Sumário

Abstract	i
Resumo	ii
Prefácio	iv
Agradecimentos	v
Sumário	vii
Lista de Figuras	ix
1 Introdução	1
1.1 Galáxias: Aspectos Gerais	1
1.2 Por que Estudar as Galáxias com Jatos?	5
1.3 Problema Proposto e a Contribuição Científica Associada.	9
2 Revisão Bibliográfica	13
3 Metodologia	15
3.1 Possíveis Maneiras de Obter um Falso Jato	15
3.2 Critérios Adicionais de Seleção	25
4 Amostra e Dados Observacionais	27
4.1 Base de Dados 6dFGS (Six-degree-Field Galaxy Survey)	27
4.2 Identificação das Linhas de Emissão	29
4.3 Imagens Multibandas	30
4.4 Espectros e Multibandas	32
5 Sistema Web	35
5.1 Cadastro de Usuários	37
5.2 Análise de requisitos	38
5.3 Modelagem do Sistema	38
5.3.1 Diagrama de Caso de Uso	39
5.4 Modelagem do Banco de dados	39

5.4.1	Diagrama de Entidade-Relacionamento	40
5.5	Desenvolvimento Front-end	40
5.6	Desenvolvimento Back-end	42
5.7	Implantação do Sistema	43
6	Populações Estelares Simples	44
6.1	Uma Visão Geral	44
6.2	A Síntese de População Estelar	46
6.3	O Código STARLIGHT	47
7	Resultados	50
7.1	Fotometria	50
7.1.1	Atividade Nuclear e Jatos em Galáxias	52
7.1.2	Diagrama de Cores	54
7.2	Síntese Espectral	56
7.3	Algumas Questões sobre os Jatos nas Galáxias Estudadas.	59
8	Considerações Finais	61
9	Redução e Medidas: Pacotes de Programas Utilizados	63
9.1	IRAF	63
9.2	Linguagens de Programação	63
9.2.1	IDL	63
9.2.2	Python	63
9.2.3	Demais linguagens de programação	64
Referências Bibliográficas		65
A	Galáxias com linhas de absorção.	72
B	Galáxias com linhas de emissão.	73
C	Sínteses Espectrais do Starlight.	74

Listas de Figuras

1.1	Classificação morfológica	3
1.2	M87 (NGC 4486, Arp 152). O jato consiste de material gasoso ionizado, elétrons e outras partículas subatômicas, emitidos a uma velocidade próxima da velocidade da luz, a partir do núcleo da galáxia.	6
1.3	Galáxia com Jato. Categoria 7.	7
1.4	Galáxia com Cauda e Laço de Matéria. Categoria 15.	7
1.5	Exemplo de análise espectrofotométrica realizada para a galáxia peculiar AM 0007-38 (GALEXASC J000702.28-380300.5). As imagens representam as seguintes bandas, da esquerda para a direita. Superior: DSS2 Blue, 2MASS-J e 2MASS-K. Inferior: WISE 3.4, Wise 2.2 e GALEX FAR UV.	9
1.6	Projeção Aitoff	10
1.7	Jatos e Radiogaláxias.	11
1.8	Radiogaláxias	11
3.1	UGC 3810	16
3.2	NGC 1568	17
3.3	NGC 4650A	18
3.4	ARP 207	19
3.5	NGC 1275	20
3.6	ugc01198	21
3.7	nge573	22
3.8	Fairall 071	23
3.9	UGC 1378	24
3.10	NGC 1602	25
4.1	28
4.2	AM 0222-250	32
4.3	AM 1146-270	33
5.1	Plot no Sistema	36
5.2	Diagrama de Caso de Uso	39
5.3	Diagrama Entidade-Relacionamento	40
5.4	Layout do Sistema	42

6.1	Saída do Código Starlight	49
7.1	Análise fotométrica para a galáxia AM 0233-453	51
7.2	Análise fotométrica para a galáxia AM 0256-364	52
7.3	Diagrama cor-cor, mostrando a localização da classificação de diferentes tipos morfológicos. Nesta, incluímos as galáxias peculiares desse estudo.	55
7.4	Síntese espectral da galáxia peculiar AM 2359-381.	57
7.5	Síntese espectral da galáxia peculiar AM 0633-352	58
7.6	Vetor de População da Amostra.	59

Capítulo 1

Introdução

1.1 Galáxias: Aspectos Gerais

O século XX, em particular, marcou a ciência astronômica com importantes conquistas científicas e abriu importantes janelas de investigação para o presente século. O astrônomo americano Harlow Shapley (1885-1972), por exemplo, apresentou em 1918 uma importante conclusão sobre a nossa Galáxia¹: o Sol não se encontra no centro da Via Láctea, mas está localizado na região periférica da mesma, na direção da constelação do Sagitário. Em adição, Shapley também estimou que a Galáxia possui um diâmetro total de 100 mil anos-luz e que possuía cerca de 10^{11} estrelas. Claramente, tratam-se de resultados revolucionários para além da Astronomia, pois também envolve um outro aspecto fundamental e que reflete diretamente na nossa concepção de lugar, ou seja, de que não ocupamos nenhuma posição especial ou privilegiada no Universo conhecido. De acordo com os resultados observacionais mais precisos que ora dispomos, o Sol se encontra a cerca de 28 anos-luz do centro galáctico, e possui magnitude absoluta integrada estimada em $-20,6$.

Explanando um pouco mais, a Via Láctea é uma Galáxia espiral do tipo barrada, formada basicamente por quatro estruturas: (i) a região nuclear central, na qual contém um buraco negro supermassivo, circundada por um (ii) bojo alongado formado por estrelas velhas. Em seu entorno, temos (iii) o disco galáctico, cujo diâmetro é da ordem de 100 mil anos-luz. Neste disco encontram-se estrelas jovens, nebulosas e regiões de formação estelar, que se organizam de forma a criar os quatro braços principais da Galáxia. Finalmente, ao redor destas estruturas encontramos o (iv) halo galáctico, cujos componentes mais proeminentes são os aglomerados globulares de estrelas velhas que orbitam o centro Galáctico. Ainda, podemos destacar ao redor um halo de gás circundante, além da matéria escura, que, embora não seja detectada diretamente, desempenha um papel importante na dinâmica de rotação.

¹Adotaremos a convenção de escrever a nossa Galáxia (Via Láctea, aquele à qual o Sol pertence) com letra maiúscula, e as demais com letras minúsculas.

Apesar da referida conclusão de Shapley caracterizar um resultado impactante para a Astronomia, uma distinção clara entre a Via Láctea e o restante do Universo ainda não estava perfeitamente compreendida para os astrônomos da época. Na verdade, até o início dos anos 20 do século passado, a convicção de que a Galáxia era única e que, para além dela, o Universo era essencialmente vazio, reinava consensualmente entre os astrônomos da época. Alguns anos depois, em 1926, um outro astrônomo americano, Edwin Hubble (1889-1953), utilizando o telescópio de 2,5m do monte Wilson, rompe com tal convicção e discute a existência de galáxias exteriores à nossa. Determina a distância entre uma galáxia espiral M33 (galáxia do Triângulo²) e a Terra, empregando a luminosidade intrínseca (comparando as magnitudes aparente e absoluta) de algumas estrelas características (cefeidas) situadas nesta galáxia.

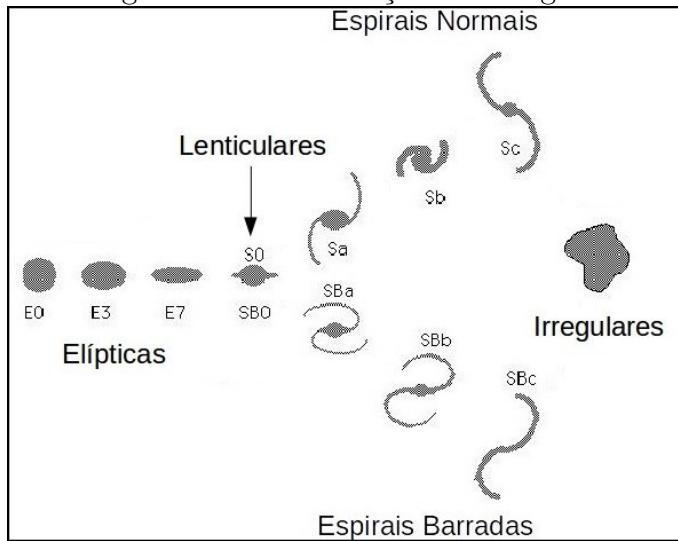
A partir do resultado surpreendente de que a distância de M33 era muito superior às dimensões da nossa própria Galáxia, a janela para a Astronomia Extragaláctica foi aberta e a exploração de novos objetos foi iniciada com a construção de telescópios maiores, detectores e instrumentos modernos e mais sensíveis nos campos da fotometria, espectroscopia e polarimetria. Excetuando os fatores que interferem na observação de solo (sobretudo atmosféricos), as galáxias possuem características bem diferentes quando comparados em termos de suas composições estelares, taxas de formação estelar, composições químicas, gás, poeira, etc [Kennicutt 1998]. As galáxias atualmente conhecidas, cujas constituições são, por exemplo, semelhantes as da Via Láctea (uma morfologia espiral barrada com bojo, disco estelar e gasoso, halo estelar e de matéria escura), apresentam aspectos diversos resultantes não apenas da distribuição das estrelas que as compõem, mas também dos processos dinâmicos intrínsecos das mesmas.

De acordo com as observações no visível, as galáxias podem ser alocadas em uma sequência morfológica bem definida que, de forma simplificada, podem ser agrupadas em três distintas categorias (elípticas, lenticulares e espirais), conforme definido por Hubble [Hubble 1926]. Também incluímos nessa análise as galáxias irregulares, introduzidas posteriormente, conforme observado na figura 1.1. Uma breve descrição é apresentada a seguir:

Galáxias elípticas: são objetos que apresentam isofótas sem nenhuma subestrutura claramente definida. São subdivididas de acordo com o parâmetro n , $n = 10(a-b)/a$, onde 'a' é o semi-eixo aparente maior e 'b' o semi-eixo aparente menor. Existem galáxias elípticas em um grande intervalo de elipticidade ou achatamento aparente ($\epsilon = 1-b/a$), com $0 \leq \epsilon \leq 0.7$. Galáxias deste tipo que apresentam achatamento aparente igual a zero apresentam estrutura circular quando projetadas no plano do céu. Um exemplo é a M87 (NGC 4486), cuja cor amarelada representa a predominância de estrelas velhas e frias. De uma maneira geral, quanto maior o valor do parâmetro n , maior o achatamento da estrutura tridimensional da galáxia.

²M33, NGC 0598, foi uma das primeiras galáxias espirais a ser identificada como tal, segundo William Parsons (1800-1867). A primeira galáxia foi a espiral M51 (NGC 5194), onde o desenho original é muito semelhante as modernas imagens.

Figura 1.1: Classificação morfológica.



Fonte: [Brandt 2017] - modificada

Classificação morfológica (não evolutiva) das galáxias proposta por Hubble. Trata-se, na verdade, de um primeiro indício de padrão morfológico no Universo próximo.

Galáxias S0: são geralmente denominadas de lenticulares e podem ser definidas como uma transição entre as galáxias elípticas e as espirais. Esses objetos apresentam em torno do bojo uma estrutura de disco sem a presença de braços espirais. Um exemplo é a NGC 3115, caracterizada pelo disco e um grande bojo estelar na região central.

Galáxias espirais: essas objetos apresentam uma estrutura de disco com braços em formato espiral, e um bojo na região central. Tais galáxias apresentam duas subclassificações: espirais normais (S) e espirais barradas (SB). Cada uma dessas subclasses é classificada de acordo com a razão de brilho entre o bojo e o disco, além da quantidade e enrolamento dos braços; assim, de Sa para Sc a razão de brilho entre o bojo e o disco diminui, o número de braços decresce e os braços ficam menos enrolados. NGC 1300 é um exemplo de espiral barrada, com um núcleo central, uma barra, formada por estrelas, gás e poeira, que o atravessa, e braços espirais que se estendem a partir das extremidades da barra. Por outro lado, temos M31 (galáxia de Andrômeda) como um exemplo de não barrada, a espiral mais próxima da Via Láctea. Se nome é derivado da constelação onde está situada, que, por sua vez, tem seu nome derivado da princesa mitológica Andrômeda.

Galáxias irregulares: são os objetos que não apresentam uma estrutura em grande escala bem definida, mas podem exibir várias subestruturas. Como exemplos, podemos destacar a Pequena e a Grande de Magalhães. Representam galáxias anãs e satélites da Via Láctea. A Grande Nuvem é o protótipo de uma subclasse de galáxias irregulares. Estas nuvens foram classificadas por Hubble como Irr I. A Pequena Nuvem é provavelmente um disco distorcido por forças gravitacionais de maré.

Apesar de comumente aceita, a classificação morfológica não inclui algumas galáxias que apresentam aspectos morfológicos diferenciados destas, ou seja, com características “peculiares³”, individuais ou em grupos. Tais galáxias também estão presentes no Universo e representam uma rica fonte de informação para o campo da Cosmologia, pois algumas características físicas observadas como a massa, o tamanho e a história de formação estelar, fornecem importantes pistas de como estas intrigantes estruturas se formaram e evoluíram em diferentes redshifts (z).

Do exposto acima, podemos dizer que a classificação morfológica de Hubble se aplica, em uma primeira aproximação, em objetos que não passaram ou não estão passando por intensos processos interativos. Quando uma interação gravitacional encontra-se presente, a morfologia dos objetos envolvidos fica visivelmente afetada, sendo o resultado final observado oriundo de um dos possíveis mecanismos de interação:

- Colisão: está associado a um parâmetro de impacto no qual os objetos colidem, podendo trocar material ou não; após o evento, os objetos se afastam;
- Fusão: relaciona-se ao desaparecimento gradativo dos objetos presentes no processo de interação, e ao aparecimento de uma estrutura única, fusionada;
- Efeito maré: neste caso, um objeto passa próximo de outro(s) e afeta o campo gravitacional, gerando, assim, uma perturbação interna.

Nesse sentido, estamos argumentando que o fruto do processo interativo facilita o surgimento de morfologias peculiares. Entretanto, nem toda morfologia irregular é resultado de interação. A natureza intrínseca das galáxias pode ser estudada de forma fotométrica (visual) ou espectroscópica (linhas de absorção/emissão). Portanto, há objetos que podem ter sua morfologia “normal”, porém seu espectro ser peculiar com linhas de emissão largas e intensas. A recíproca também é verdadeira para objeto com morfologia peculiar e espectro “normal”.

Diante desse contexto contraditório em termos das diferentes características morfológicas observadas, coube ao astrônomo americano Halton Arp (1927-2013) o legado de apresentar e discutir sobre a natureza das galáxias classificadas morfologicamente como peculiares, através do seu “*Atlas of Peculiar Galaxies*”, no qual catalogou e publicou [Arp 1966] muitas galáxias em processo de interação e de fusão. Na verdade, ele estava preocupado com o fato dos astrônomos de sua época entenderem muito pouco a respeito da evolução das galáxias, de modo que o Atlas tinha o intuito de prover imagens que poderiam fornecer a esses astrônomos dados passíveis de estudos sobre a evolução das mesmas. Mais tarde, Arp usaria seu Atlas como evidência em seu debate sobre os objetos quasi-estelares (quasares), isto é, distante e muito energético, inicialmente descobertos pela emissão em ondas de rádio. Contudo, hoje sabemos que a maioria (90%) é do tipo “rádio-silencioso” (*radio-quiet*). Também

³Peculiaridade do ponto de vista espectroscópico, significa linhas de emissão largas e intensas. Do ponto de vista morfológico, significa características não usuais encontradas nas galáxias presentes no esquema de Hubble, como núcleos deslocados, pontes e caudas de matéria, jatos, anéis, absorções não usuais de poeira, etc.

são fontes luminosas no infravermelho, ultravioleta e raios-X, com linhas de emissão largas e intensas.

Em adição ao trabalho feito para o Hemisfério Norte, um catálogo para o Hemisfério Sul também foi compilado “*A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations*” [Arp e Madore 1987], incluindo 25 distintas Categorias⁴ com os mais intrigantes objetos que representam importantes laboratórios para o estudo de vários processos físicos no Universo local ($z < 1,0$). Halton Arp também é conhecido por ser crítico da teoria do Big Bang e por defender uma Cosmologia não-linear que incorpora um redshift intrínseco. Em particular, os objetos da Categoria 7 (“Galáxias com Jatos”) presentes neste último Catálogo foram selecionados para estudo nesta Dissertação de Mestrado, onde discutiremos aspectos individuais (e também comuns) fornecidos pelas técnicas da fotometria e da espectroscopia, além abordar a motivação científica que justificou a nossa escolha de explorar as propriedades nucleares e extranucleares desses objetos.

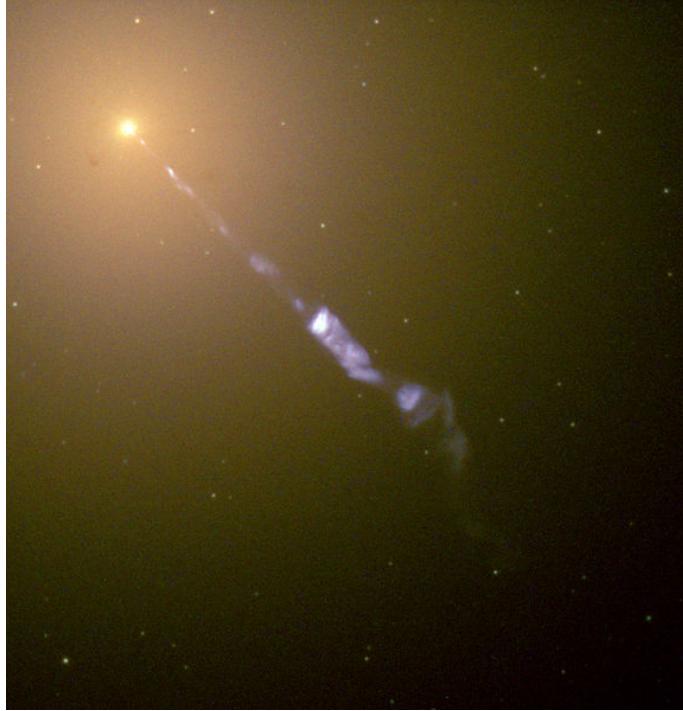
1.2 Por que Estudar as Galáxias com Jatos?

No catálogo de Arp & Madore compilado para o Hemisfério Sul, a Categoria 7 trata exclusivamente das galáxias com jatos, cujo entendimento da natureza peculiar pode revelar importantes pistas para a compreensão dos processos físicos que ocorrem na região nuclear desses objetos. Mas, de certa forma, já podemos dizer com uma dada segurança, que determinados processos físicos que levam à determinadas peculiaridades observadas nos objetos que compõem os catálogos de Arp & Madore (de ambos hemisférios), são, razoavelmente, bem entendidos. Um grande número de objetos são galáxias em processo de interação gravitacional, como, por exemplo, as famosas galáxias do Redemoinho (M51, Arp 85), e as galáxias Antena (NGC 4038/NGC 4039 ou Arp 244), favorecendo, assim, o conhecimento de determinadas características peculiares. Por outro lado, algumas galáxias anãs presentes são objetos que simplesmente não alcançaram massa suficiente para produzir gravidade que permitisse a formação de uma estrutura mais coesa. NGC 1569 (Arp 210) é um exemplo dessas galáxias anãs. Algumas outras galáxias são caracterizadas como rádio-galáxias. Tais objetos possuem um núcleo galáctico ativo que produzem poderosos jatos relativísticos de gás chamados rádio-jatos (ver Figura 1.2). São poderosas fontes de radiação síncrotron, especialmente em ondas de rádio. As rádio-galáxias próximas M87 (Arp 152) e Centaurus A (Arp 153) são alguns desses exemplos.

No caso particular das galáxias com jatos presentes no Categoria 7, trabalhamos com a hipótese de que alguns desses objetos poderiam pertencer, mais adequadamente, à uma outra categoria do catálogo, na qual incluem peculiaridades relacionadas com ”caudas”, ”laços de matéria” e ”detritos”, ou seja, a Categoria 15: ”*Galaxies with Tails, Loops of Material or Debris*”. As Figuras 1.3 e 1.4 ilustram exemplos

⁴https://ned.ipac.caltech.edu/level5/SPGA_Atlas/frames.html

Figura 1.2: M87 (NGC 4486, Arp 152). O jato consiste de material gasoso ionizado, elétrons e outras partículas subatômicas, emitidos a uma velocidade próxima da velocidade da luz, a partir do núcleo da galáxia.



Fonte: Hubble Space Telescope.

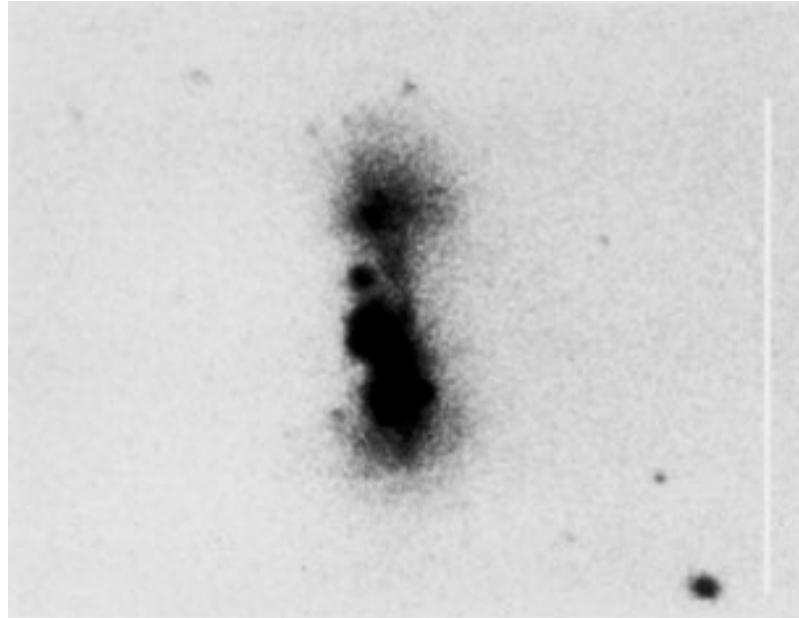
Observe o jato de partículas que sai da região nuclear de M87 (NGC 4486) e que se estende por cerca de 5 anos-luz.

destas duas Categorias, evidenciando as peculiaridades em cada caso (jatos e caudas, respectivamente). A partir das Figuras, ficam claras as diferenças entre essas duas peculiaridades. Os jatos são retilíneos, diferentemente das características da Figura 1.4, embora esse assertiva pode ser questionada em alguns objetos. Em ambas imagens, a direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

Na verdade, como se tratam de objetos interagentes, possíveis companheiras acidentalmente superpostas, ou mesmo estrelas projetadas nas imagens, podem dar uma falsa aparência de um jato. Por outro lado, muitos jatos podem ser fracos ou estreitos, também levando a uma falsa impressão. Outros, podem estar centralmente localizados perto dos núcleos de galáxias de alto brilho superficial, onde a análise em diferentes bandas espectrais seriam necessárias para uma correta investigação, visto que as imagens antigas obtidas através de emulsões fotográficas (IIIa-J) poderiam, facilmente, saturar os jatos durante longas exposições.

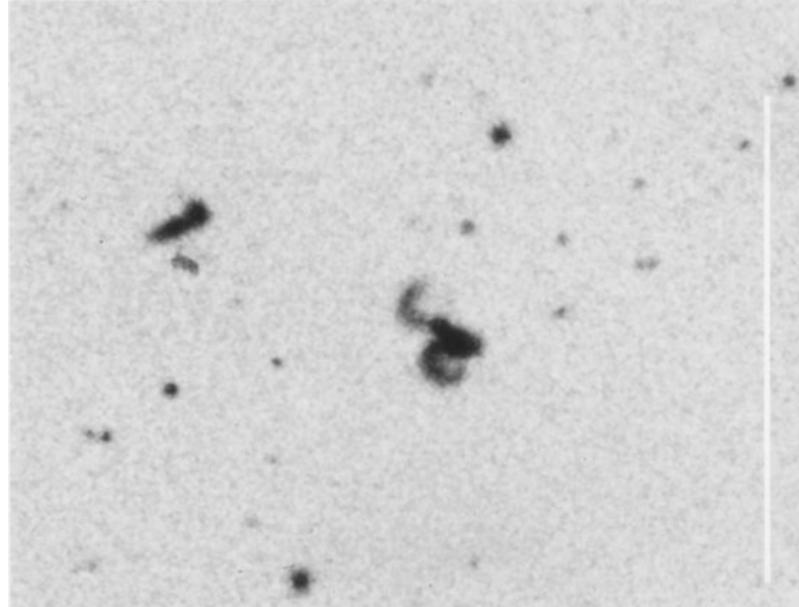
Nesse sentido, para verificar tais possibilidades e melhor caracterizar a natureza desses objetos, analisamos neste trabalho um conjunto de imagens fotométricas em diferentes bandas: SDSS (B e R, visível), 2MASS (vermelho, J; poeira, K), WISE (infravermelho, 3.4 e 22 μm), e GALEX (ultravioleta próximo). No entanto, apesar

Figura 1.3: Galáxia com Jato. Categoria 7.



Fonte: [Arp e Madore 1987].
AM 0427-273 (Categoria 7)

Figura 1.4: Galáxia com Cauda e Laço de Matéria. Categoria 15.



Fonte: [Arp e Madore 1987].
AM 0015-315 (Categoria 15)

de toda facilidade apresentada, é importante afirmar que nenhuma completude para nossa pesquisa em relação aos jatos interiores deverá ser alcançada nesse trabalho, restando, certamente, outras análises e estudos mais refinados.

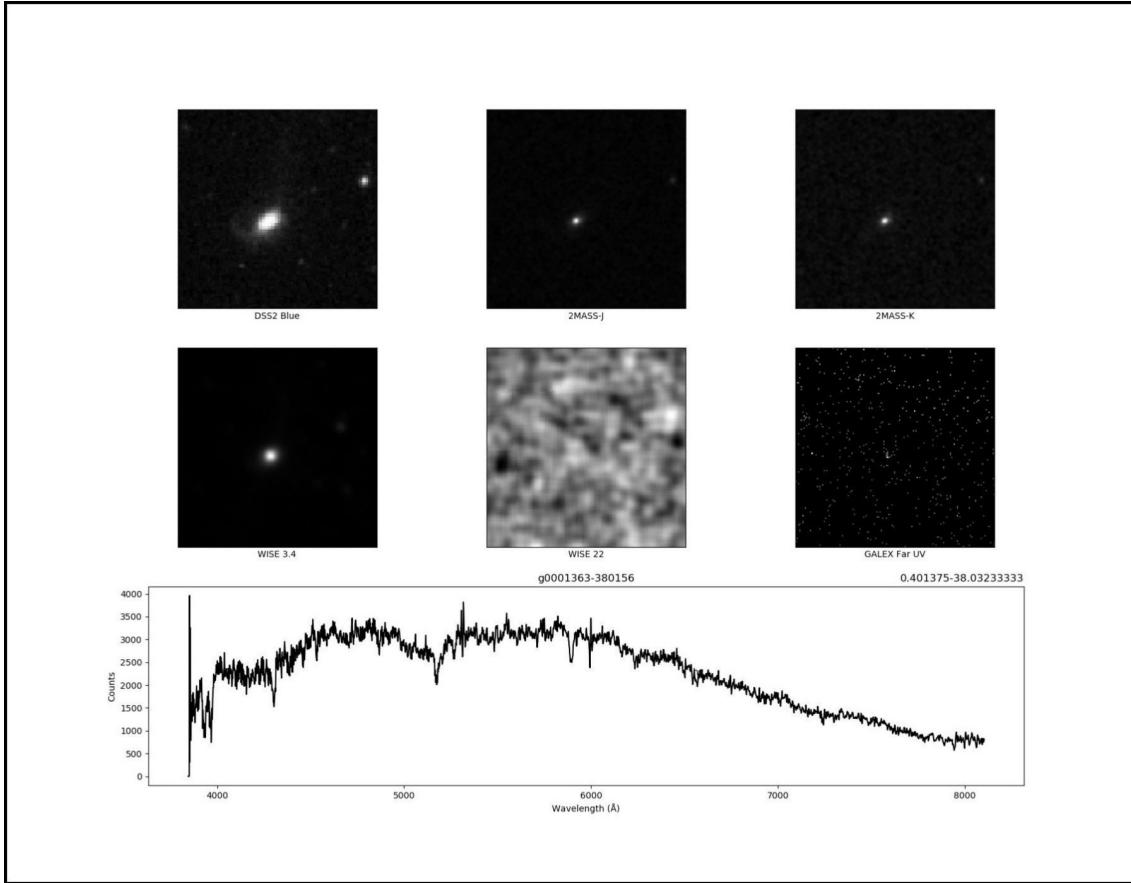
As imagens do SDSS dispõem de informação da banda B, que possibilita uma análise dos componentes de maior energia, e da banda R, componentes mais avermelhados, portanto, de natureza mais fria. Já as imagens do 2MASS e WISE fornecem informações de estrelas velhas e da poeira, que irá depender da banda usada. Com o GALEX, procuramos evidenciar estruturas de altas energias, como estrelas do tipo O e B ou galáxias com núcleos ativos. Usamos a biblioteca "astroquery" do python [Sipocz 2016] para fazer o download das imagens, em formato FITS, que é a extensão amplamente usada na Astronomia para imagens e tabelas. A manipulação das imagens foi feita com o astropy.io, pacote do python que acessa arquivos FITS.

Para complementar tais análises, também usamos espectros no óptico observados no Observatório do Pico dos Dias/LNA-MCTIC e extraídos da literatura, 6dF Galaxy Survey (6dFGS), no qual cobrem uma ampla faixa espectral que contém as principais linhas de absorção e de emissão usadas para investigar algumas propriedades do núcleo, como cinemática, atividade nuclear e população estelar. A Figura 1.5 ilustra um exemplo dessa compilação espectrofotométrica.

Ao classificar as galáxias observadas como peculiares na Categoria 7, Arp & Madore ainda criaram quatro subcategorias para as mesmas: (i) jatos de galáxias centrais elípticas (E) ou do tipo-elíptica (E-like), bastante amplos ou difusos que emergem destes objetos; (ii) jatos de galáxias espirais (ou do tipo espiral), amplos ou estreitos, fracos e difusos, (iii) jatos de vários tipos de galáxias, geralmente um pouco mais estreitos do que nas duas subcategorias precedentes, e que emergem de uma variedade de diferentes tipos de objetos centrais; (iv) jatos de galáxias companheiras, onde filamentos ou jatos emergem de objetos vizinhos, talvez em processos de interação. A Figura 1.6 ilustra a distribuição (projeção Aitoff) das 125 galáxias com informações espectrais (73 com linhas de emissão) e 52 (com linhas de absorção), de acordo com as coordenadas galácticas.

Do exposto acima, estamos apresentando um rico cenário de investigação científica neste trabalho dissertativo, cujo entendimento ainda não foi completamente estabelecido, embora tenhamos importantes dados na literatura que possam fornecer importantes pistas sobre a natureza desses objetos. Portanto, pretendemos iniciar uma pesquisa que possa direcionar para a compreensão particular desta Categoria.

Figura 1.5: Exemplo de análise espectrofotométrica realizada para a galáxia peculiar AM 0007-38 (GALEXASC J000702.28-380300.5). As imagens representam as seguintes bandas, da esquerda para a direita. Superior: DSS2 Blue, 2MASS-J e 2MASS-K. Inferior: WISE 3.4, Wise 2.2 e GALEX FAR UV.



Fonte: Próprio autor.
Painel superior: fotometria; Painel inferior: espectroscopia.

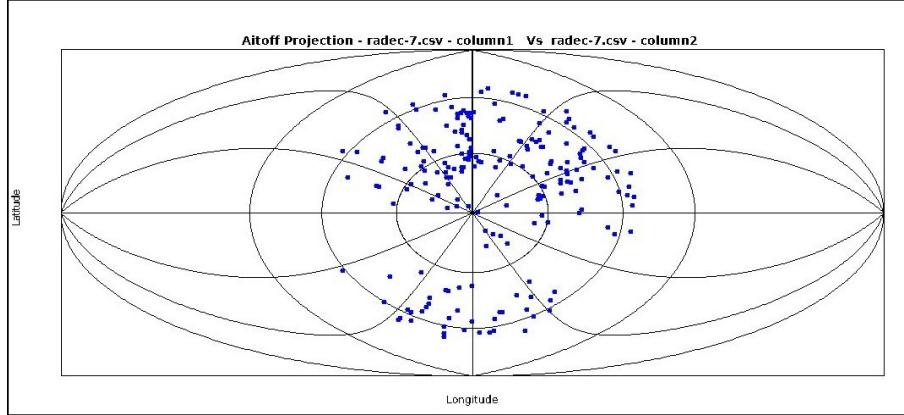
1.3 Problema Proposto e a Contribuição Científica Associada.

De um modo geral, as galáxias peculiares conhecidas⁵, distribuídas em ambos hemisférios, representam uma classe pouco estudada pelas usuais técnicas fotométricas e espectroscópicas (e também polarimétricas), quando comparadas, por exemplo, com as outras galáxias presentes na classificação morfológica de Hubble (ver Figura 1.1).

O processo de interação gravitacional envolvendo galáxias no Universo local representa, atualmente, um fenômeno bastante comum e bem documentado. Os diversos

⁵Estudos baseados em surveys (levantamentos astronómicos) poderão classificar e fornecer novas galáxias peculiares. Veja lista em <https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical>.

Figura 1.6: Projeção Aitoff



Fonte: Próprio Autor.

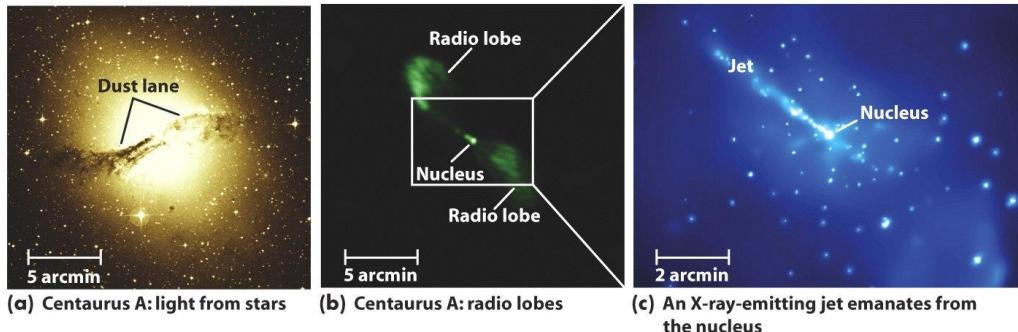
Projeção Aitoff das galáxias presentes na Categoria 7. Visão a partir do pólo sul galáctico.

tipos morfológicos observados (incluindo nestes as galáxias peculiares) podem ter sua origem, parcial ou total, associado ao fenômeno de interação gravitacional, e não apenas na evolução dinâmica do objeto em um estado físico isolado. Esta propriedade perturbativa e os resultados obtidos sugerem fortemente uma revisão do nosso ponto de vista sobre a classificação e a evolução destes objetos.

A Categoria 7 escolhida para o estudo merece um particular interesse pelo fenômeno físico associado, que é diferente da característica observada em quasares e rádio-galáxias, i.e., a presença de jatos de matéria saindo da fonte central localizada no núcleo destas galáxias. Neste caso, a explicação mais plausível para os jatos nesses objetos (ver Figura 1.7) são as de partículas carregadas movendo-se em um campo magnético (emissão por mecanismo Síncrotron). Como a trajetória seguida pelas partículas é helicoidal, seu movimento é acelerado e elas acabam irradiando energia (ver Figura 1.8). Portanto, a compreensão da formação dos jatos para o entendimento dos processos físicos nas galáxias peculiares da Categoria 7, representa um problema científico diferente que precisa ser investigado a luz das técnicas espectrofotométricas no óptico, fora, portanto, das usuais observações em rádio e raios-X. Por outro, como interações gravitacionais podem explicar parte desta característica peculiar observada, simulações de n-corpos também representa uma importante fonte de investigação, que poderá ser explorada em um futuro trabalho.

Espectros de galáxias observados em diferentes comprimentos de onda são bastante abundantes e acessíveis em diversos bancos de dados. Alguns surveys extragalácticos são dedicados para a coleta e análise destes espectros, como os projetos SAURON [Tim de Zeeuw et al. 2002], 6dFGS (JONES et al. 2004), ATLAS 3d [Cappellari et al. 011a], CALIFA [Sánchez et al. 2012], MASSIVE [Ma et al. 2014] e SDSS [Alam et al. 2015]. Todos esses projetos apresentam como um de seus objetivos o estudo de populações estelares em galáxias. Porém, boa parte dos mesmos

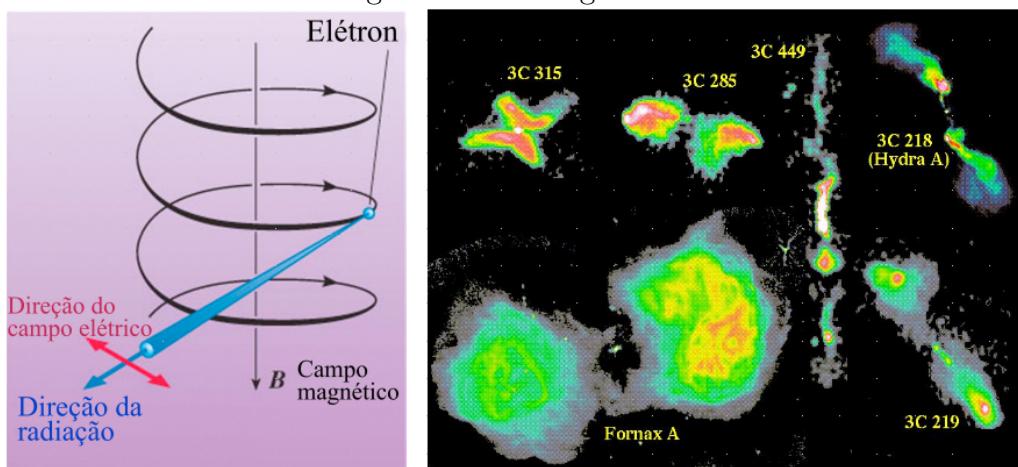
Figura 1.7: Jatos e Radiogaláxias.



Fonte: [Freedman e Kaufmann 2008]

Radiogaláxia Centauro A, uma galáxia elíptica a ~ 4 Mpc. No visível (imagem da esquerda), a mesma parece como uma elíptica com uma peculiaridade: muita poeira. Em rádio (imagem central) com os lóbulos bem evidentes e em raios-X (direita) um jato saindo do núcleo. Estes jatos observados em rádio e raios-X indicam processos muito energéticos.

Figura 1.8: Radiogaláxias



Fonte: [Burrows 2000]

As radiogaláxias estão associadas às galáxias elípticas gigantes. A emissão rádio apresenta diversas morfologias e a fonte de energia está associada ao núcleo.

exploram o hemisfério celeste norte, deixando o sul relativamente pouco explorado. Na literatura, existem trabalhos que analisam amostras de espectros de diversas categorias do catálogo de Arp & Madore, com o objetivo de investigar as propriedades da região central, extranuclear, população estelar, parâmetros físicos e geométricos, etc., por exemplo, [Sekiguchi e Wolstencroft 1993, Donzelli e Pastoriza 2000, da Rocha-Poppe et al. 2011, Faúndez-Abans et al. 2015, Freitas-Lemes et al. 2017, Krabbe et al. 2017]. No entanto, as galáxias selecionadas na Categoria 7 para o presente estudo, são ainda pouco estudadas e muitas delas sem quaisquer infor-

mações espectrais detalhadas. Este aspecto assegura, portanto, uma originalidade ao presente trabalho, onde os resultados oriundos da síntese espectral via código STARLIGHT [Cid Fernandes et al. 2004, Fernandes et al. 2005, Asari et al. 2007] (inéditos para a quase totalidade) e das análises em diagramas de diagnóstico a partir do espectro residual obtido através da síntese, permitirão contribuir para um melhor conhecimento desses objetos peculiares e, sobretudo, da natureza dos jatos observados na banda óptica.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Antes das galáxias peculiares do Hemisfério Sul serem compiladas em um catálogo geral com diferentes Categorias por [Arp e Madore 1987], “*A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations*”, observações no óptico de alguns objetos da Categoria selecionada para este trabalho já haviam sido observados e catalogados previamente por [Dreyer 1888], [Vorontsov 1968] e [Vorontsov-Velyaminov 1977].

Com a conclusão final do catálogo por Arp & Madore, o número de resultados fotométricos e espectroscópicos começou a revelar a verdadeira natureza dessas galáxias. [Coulson I. M. 1989] realizou um survey no óptico (3700-5400Å) para determinar redshifts precisos (velocidades radiais com desvios padrões da ordem de 35 km/s) para cerca de 500 galáxias, das quais cerca de 10% da Categoria 7 estavam presentes. Com o mesmo objetivo de compilar um catálogo de redshift para as galáxias do Hemisfério Sul, [Pellegrini P. S. 1991] amplia um pouco mais o trabalho anterior, porém com um erro associado um pouco maior, da ordem de 40 m/s. Segundo os autores, alguns objetos apresentam um baixo brilho superficial, sendo, portanto, muito difícil a determinação das velocidades radiais, ocasionando, desse modo, uma maior incerteza nas medidas.

Um importante catálogo fotométrico de galáxias brilhantes, RC3, foi introduzido por [de Vaucouleurs G. 1991]. Claramente, boa parte dos objetos pertencentes à Categoria 7 (assim como de várias outras), não foram incluídos devido ao baixo brilho superficial. Contudo, algumas importantes informações foram obtidas para alguns objetos e estão presentes em ambas bases de dados usadas neste trabalho, NED/NASA-IPAC e HyperLeda [Paturel et al. 2003].

O survey no óptico realizado por [Pellegrini P. S. 1991] foi ampliado em [Willmer C. N. A. Pellegrini P. S. 1998], com a introdução de magnitudes e classificações morfológicas para uma amostra de 5369 galáxias com $m_B \leq 15,5$. Os objetos tiveram posições precisas de 1'' e magnitudes com um “rms” da ordem de 0,3 mag. Apesar do esforço realizado, a grande maioria dos nossos objetos de interesse ficaram fora do estudo.

Um resultado interessante foi publicado por [Donzelli e Pastoriza 2000], onde os autores discutem as propriedades espectroscópicas no óptico de galáxias em interação (“merging”). A partir desta publicação, iremos extrair para aqueles objetos onde não obtemos dados de fenda longa no OPD/LNA, informações que poderão contribuir para entender a natureza morfológica dos jatos observados. Uma fusão de galáxias, envolvendo a Física dos buracos negros envolvidos, representa uma excelente pista para a compreensão deste particular fenômeno.

Uma contribuição no infravermelho próximo foi apresentada por [Monnier Ragaigne et al. 2003a, Monnier Ragaigne et al. 2003b], através do mapeamento da brilho superficial para cerca de 3000 galáxias nas bandas J, H e Ks (2MASS). Uma análise global ainda está sendo feita e poderá fornecer importantes pistas que poderão complementar a análise visual de alguns objetos da nossa amostra. O estudo do gás em 1038 galáxias interagentes foi apresentada por [Casasola et al. 2004]. Um resultado interessante parte da análise de que o excesso de gás molecular detectado pode ser derivado de efeitos de torque (maré). Assim, além das fusões observadas, as interações por maré sofridas por algumas galáxias das Categorias analisadas no artigo, também serão extraídas para serem estudadas de forma mais criteriosa, como um desdobramento deste trabalho.

Um survey de imageamento nas linhas do H α + [N II] foi produzido por [Kennicutt et al. 2008], como um esforço para caracterizar a população estelar de galáxias no universo local. Esta análise infere diretamente no tipo particular de atividade nuclear, que representa um dos pontos a ser atacado neste trabalho através da classificação espectral. Logicamente, os resultados serão confrontados e deverão ampliar a nossa base de objetos da Categoria 7 com formação estelar. Em adição, os resultados também apresentados por [Karachentsev e Kaisina 2013] sobre as propriedades de formação estelar (H α + ultravioleta distante-GALEX) serão analisados a luz da taxa de formação estelar esperada para uma distância de 11Mpc. Alguns dos nossos objetos de estudo encontram-se dentro desta estimativa de distância.

Fotometria de multi-banda profunda de solo (UBVRIHKs) no óptico e no infravermelho próximo [Micheva et al. 2013], assim como dados no óptico obtido com o satélite Spitzer [Knapp et al. 2014], serão explorados afim de aumentar o número de informações destes objetos. Dados também fornecidos por este satélite referente a classificação morfológica [Buta et al. 2015] e sobre a estrutura estelar [Salo et al. 2015], também serão analisado neste trabalho.

A revisão feita acima é extremamente necessária para fundamentar o objetivo principal a ser obtido neste trabalho. É claro que a mesma não está completa e deverá ser continuamente ampliada, pois alguns artigos interessantes (mais recentes) já foram sinalizados no arXiv-eprint, onde já estamos processando uma análise.

Capítulo 3

Metodologia

As galáxias com jatos que representam a Categoria 7 (na verdade, para todas as Categorias) foram agrupadas a partir da análise morfológica fornecida na época pelos filmes fotográficos (emulsão IIIa-J de grão fino) da Kodak (Eastman Kodak Company). Portanto, certos detalhes que conseguimos explorar hoje através das imagens de melhor resolução espacial, não foram possíveis nas análises prévias conduzidas por Arp & Madore. Logo, apenas com as informações presentes nas fotografias para analisar certos níveis de brilho superficial ligeiramente fracos em relação ao esperado, os autores acima poderiam facilmente omitir dados importantes, mesmo para um olho muito bem treinado. Por outro lado, as regiões externas, sendo menos densas e brilhantes, também podiam omitir importantes análises. Como as perturbações podem ter como origem atividades internas, como explosões ou ejeções, ou da interação com objetos vizinhos, fica óbvio pensar que as regiões que circundam as galáxias devem ser também cuidadosamente estudadas. Portanto, uma análise rigorosa das imagens deve ser conduzida no intuito de verificar se de fato o que está sendo observado é um jato ou alguma outra característica peculiar.

A Categoria 7 contém um total de 256 galáxias. Porém, antes de lançarmos a análise espectral desse conjunto, elaboramos uma metodologia que objetiva verificar se as galáxias presentes apresentam, de fato, jatos. A metodologia foi adaptada do trabalho sobre o reconhecimento e classificação de galáxias com jatos publicada por Keel [Keel 1985]. A amostragem final de galáxias será apresentada no próximo Capítulo.

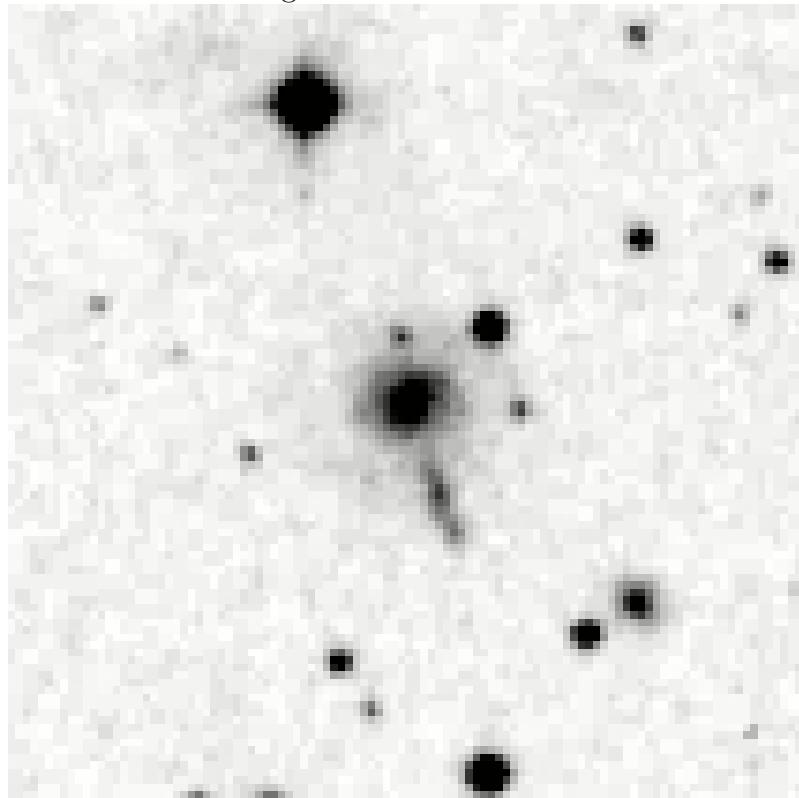
3.1 Possíveis Maneiras de Obter um Falso Jato

1. Galáxias Superpostas

Alguns “jatos” observados ao longo de nossa linha de visada podem ser, na verdade, puros alinhamentos ocasionais de galáxias, como, por exemplo, o de uma

galáxia "face-on" (i.e., de frente) alinhada com o núcleo de uma outra galáxia "edge-on" (de perfil). Um exemplo deste efeito é observado na fonte rádio DA 240 [van Breugel et al. 1983] e também na fonte 1240-057 [Romanishin 1984]. No óptico, o exemplo bem característico é o da galáxia UGC 3810 (ver Figura 3.1), onde uma companheira "edge-on" superposta foi relacionada de forma errada como um jato na literatura. Apesar da proximidade de ambos objetos, a galáxia "edge-on" não apresenta redshift determinado, sendo difícil, portanto, dizer se temos de fato um sistema interagente ou apenas a projeção de uma galáxia no campo.

Figura 3.1: UGC 3810



Fonte: NED-NASA/IPAC

Este é um claro exemplo de uma superposição entre duas galáxias: uma espiral "face-on" (centro) e uma outra superposta "edge-on" semelhante a um jato (ao Sul). A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

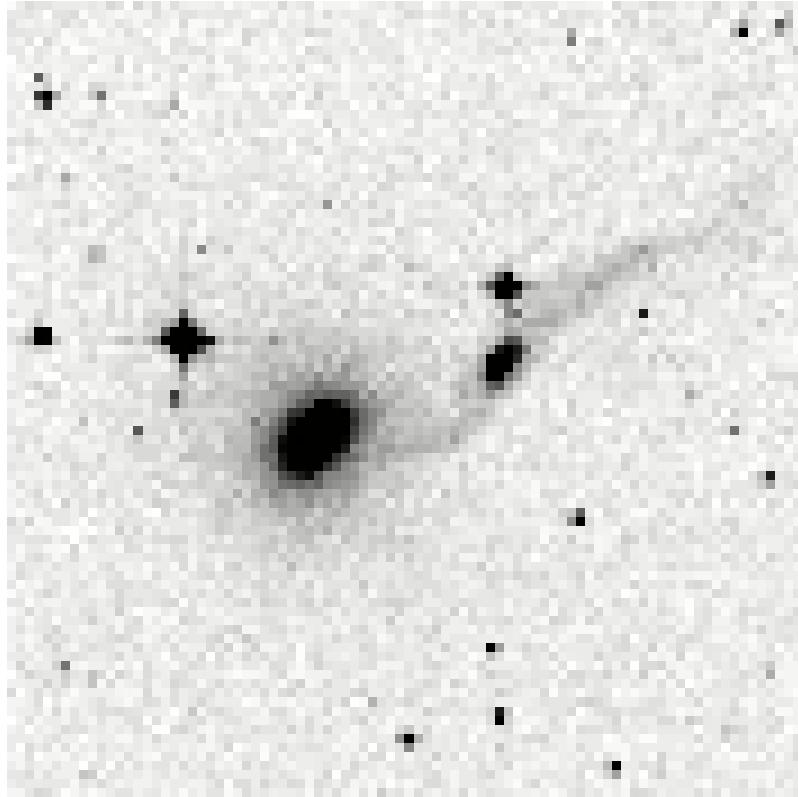
2. Efeitos de Maré e Galáxias em Interação

O principal aspecto para a escolha deste item está relacionado à observação de caudas e filamentos projetados, bem retos e estreitos, que podem aparecer como resultado final do efeito de maré em uma galáxia, não sendo, portanto, um jato. Porém, um aspecto deve ser levado em consideração, pois quando segregamos os efeitos nucleares manifestados através das linhas de emissão

presentes em galáxias interagentes (neste caso, via efeito de maré), estamos também excluindo muitos objetos com núcleos ativos que representam potenciais candidatos a jatos, uma vez que a atividade nuclear é catalisada em sistemas que se encontram em interação gravitacional, sendo os jatos os sinais internos desses processos.

Em adição, as interações mais avançadas para o estágio de fusão podem produzir uma série de efeitos quando os sistemas ricos em gás estão envolvidos, e a seleção de estruturas radiais, sem dúvida, produzirá uma fração destes efeitos. Os argumentos dinâmicos baseados no nível de atividade nuclear agora observado podem ser considerados na interpretação dessa característica. Por motivos puramente morfológicos, certos tipos de características de maré podem ser reconhecidos. Sistemas como NGC 1568 (ver Figura 3.2), com pares de caudas quase simétricas, não são susceptíveis de aparecer como jatos em imagens com resolução suficiente. Leves curvaturas e curvas terminais são mais características dos efeitos de maré do que de jatos.

Figura 3.2: NGC 1568



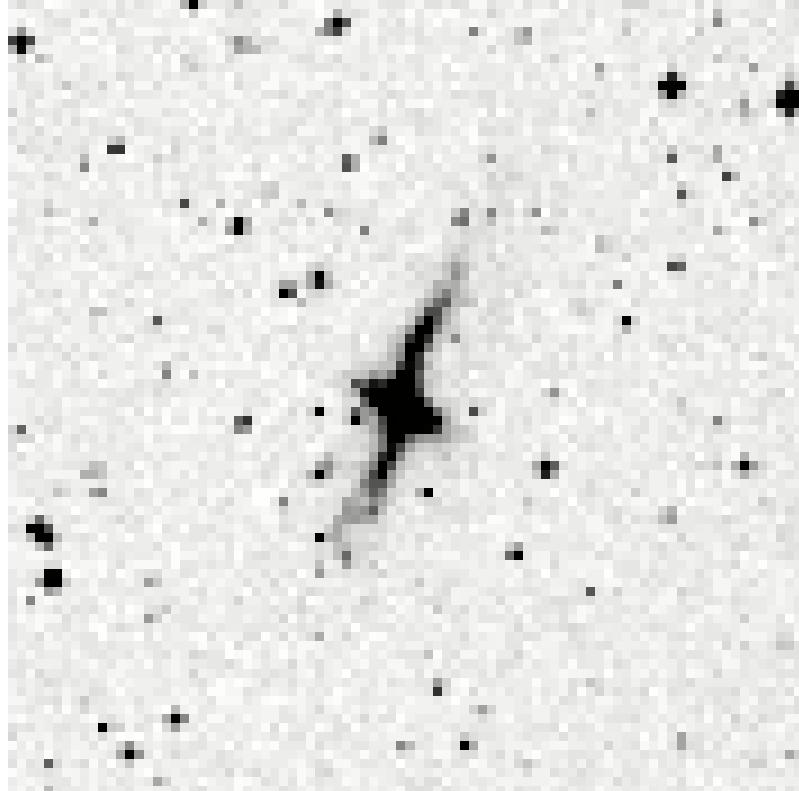
Fonte: NED-NASA/IPAC

Exemplo de uma interação gravitacional tipo maré, com a construção de uma cauda como o resultado do processo. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

3. Galáxias com Anéis Polares

Esses tipos de sistemas são detectados com maior facilidade quando o disco da galáxia principal é visto quase ao contrário [Schweizer et al. 1983], e muitos deles também apresentam anéis externos (perpendiculares) vistos quase de ponta. Os anéis de NGC 4650A (ver Figura 3.3), por exemplo, foram de fato originalmente interpretados como pares de jatos (Laustsen e West 1980; Sofue et al., 1982; Mold et al., 1982). No entanto, estes podem ser distinguidos dos jatos verdadeiros pelo fato de serem muitos simétricos sobre o galáxia central. É importante dizer que os jatos ópticos até agora conhecidos são unilaterais ou bastante assimétricos (por exemplo, NGC 1097, para os quais [Lorre 1978] relatou relações de brilho de 9:1 e 3:1 para os pares opostos de jatos). Quando não são bastante avançados, os jatos mostram frequentes absorções contra a galáxia central. Vários anéis polares e objetos aparentemente relacionados já foram observados. Algumas pistas morfológicas para a presença de um anel externo e desalinhado requer, muitas vezes, imagens de alta resolução, de modo que a distinção entre anéis e jatos geralmente não é aparente (exceto por considerações de simetria) das fotografias presentes nas placas de céu.

Figura 3.3: NGC 4650A



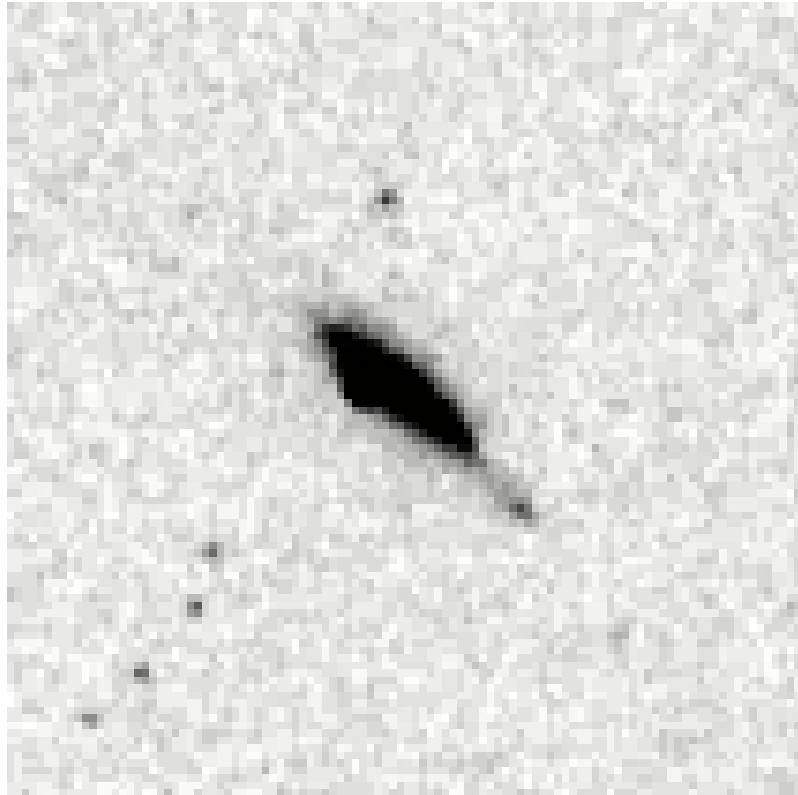
Fonte: NED-NASA/IPAC

Exemplo de um anel polar que pode dar a falsa impressão de um jato. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

4. Distribuições de Luz Assimétrica em Galáxias de Perfil (Edge-on)

Sabemos que a poeira presente ao longo dos braços de galáxias espirais produz uma forte assimetria na aparência destes objetos quando visto ao longo de seu plano [De Vaucouleurs 1958]. Fisicamente, isso significa que o lado que se aproxima do disco é mais brilhante do que o lado que se afasta. Esse contraste pode ser tão extremo quanto a aparência de um jato ao longo da eixo principal, como visto, por exemplo, na galáxia Arp 207 (Figura 3.4).

Figura 3.4: ARP 207



Fonte: NED-NASA/IPAC

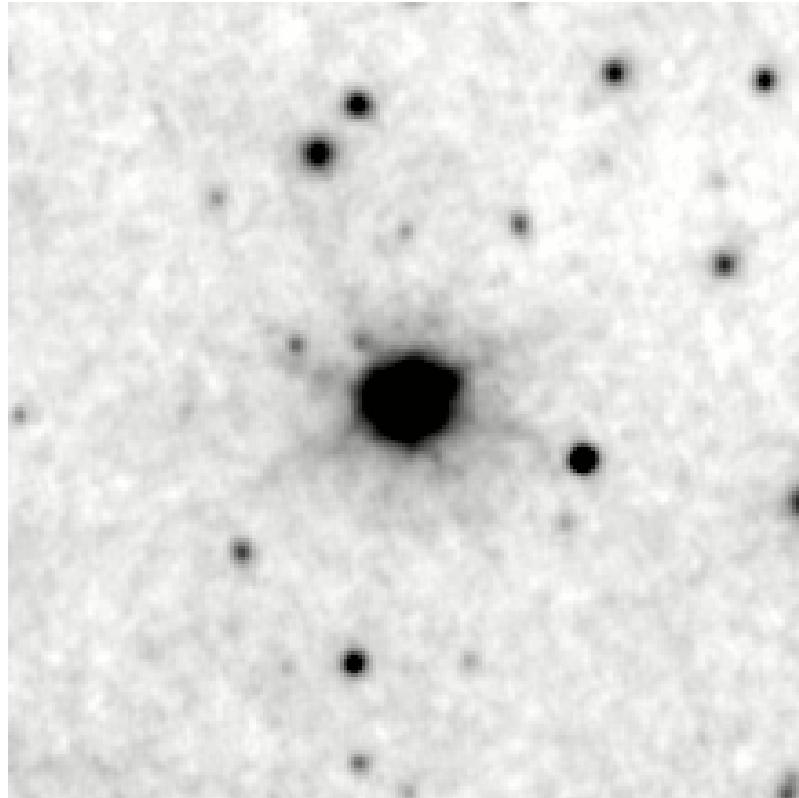
Contraste observado que pode revelar a presença de um falso jato. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

5. Galáxias com Sistemas de Filamentos Ópticos

São conhecidos vários tipos de sistemas de filamentos extensivos (linha de emissão) que ocorrem em torno de galáxias, algumas das quais apresentam características que imitam a aparência de jatos. Uma série de galáxias em aglomerados centrais apresentam filamentos de linha de emissão aparentemente associados a fluxos de acréscimo (por exemplo, [Heckman 1981]). Algumas dessas características vistas individualmente, especialmente aquelas em torno de NGC 1275 (ver Figura 3.5), poderiam aparecer como jatos. Estudos espectroscópicos sugerem que os filamentos estão caindo na galáxia [Keel 1985].

Portanto, muitos jatos ou uma aparência filamentar devem ser excluídos das pesquisas de jatos ópticos.

Figura 3.5: NGC 1275



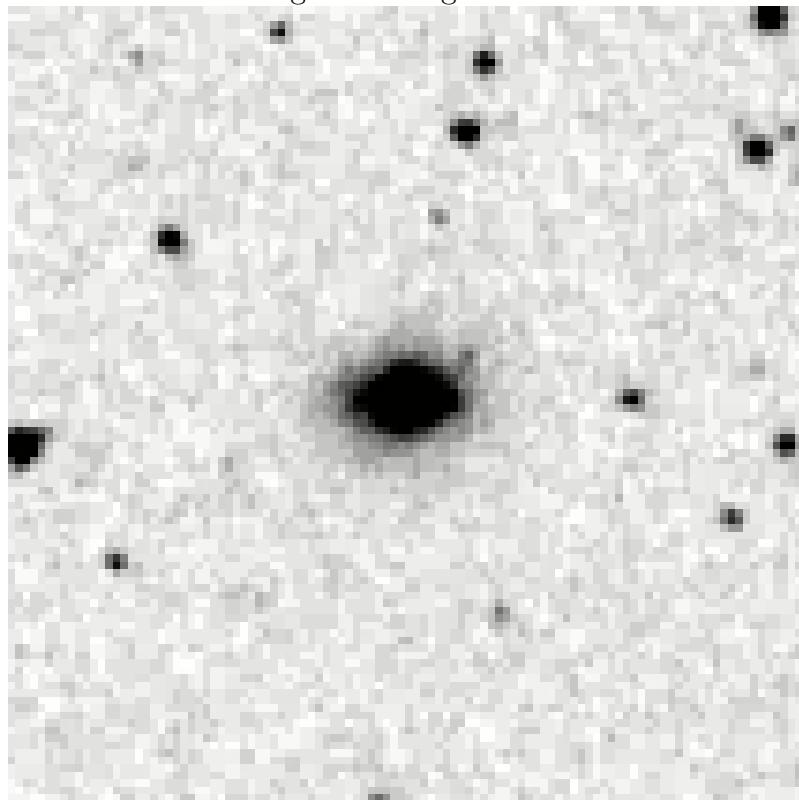
Fonte: NED-NASA/IPAC

Sistema de filamentos característicos de linhas de emissão também podem dar a falsa impressão de jatos. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

6. Barras Galácticas Normais

Ocasionalmente, especialmente no catálogo Zwicky de galáxias e aglomerados (<ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/cats/VII/190/>), os objetos são listados como jatos que parecem ser, em uma inspeção mais direta, barras bastante comuns em discos fracos. Um exemplo é a galáxia UGC 01198 (VII Zw 3), ver Figura 3.6. Portanto, esses tipos de galáxias podem ser eliminadas das pesquisas rejeitando pares com características brilhantes e simétricas, como no caso de anéis polares.

Figura 3.6: ugc01198



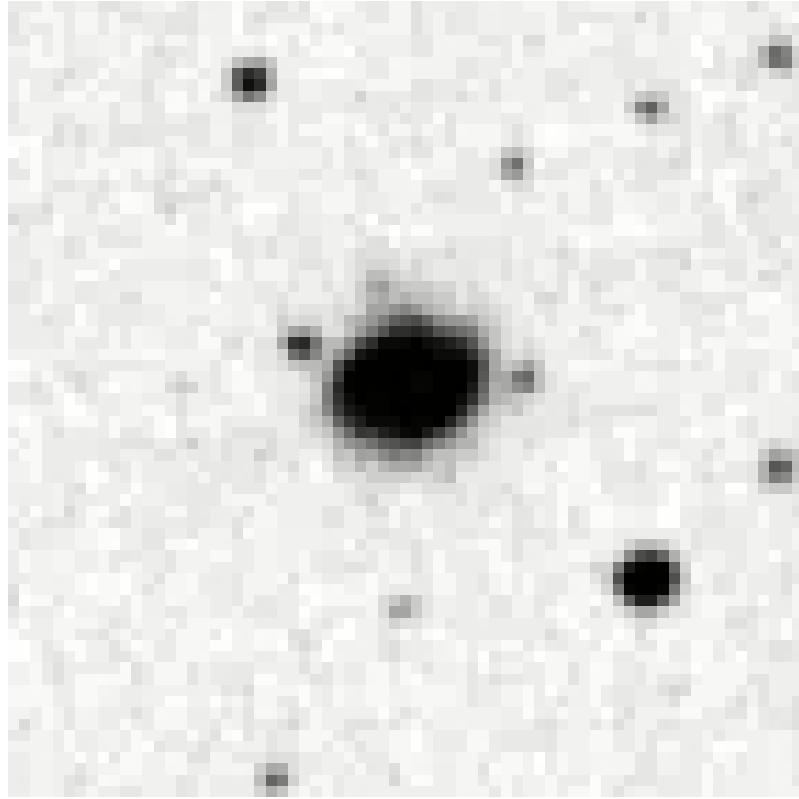
Fonte: NED-NASA/IPAC

Barras em galáxias normais representam também uma fonte comum para caracterizar jatos. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

7. Galáxias com Hastes

O astrônomo russo Vorontsov-Velyaminov em dois artigos publicados em 1959 e 1977, chamou a atenção para sistemas que apresentam conexões relativamente curtas que podem ocorrer dentro de um intervalo morfológico. Estas, por sua vez, estão associadas a formação de estrelas ativas, podendo ser o resultado de sua propagação em um disco externo. Como exemplo, o disco interno e as partes externas da NGC 573 são mostrados na Figura 3.7. As regiões internas mostram uma estrutura espiral clara. Espectros revelam linhas de emissão nuclear indicativas da formação de estrelas. Como as hastes não chegam muito para o núcleo, elas são características mais prováveis de origem local do que nuclear.

Figura 3.7: ngc573



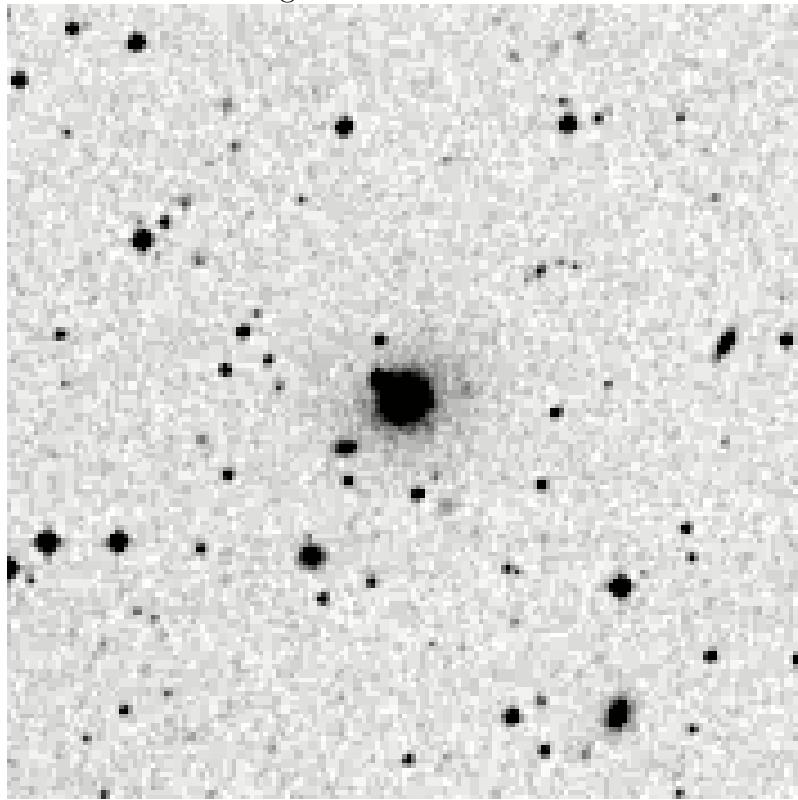
Fonte: NED-NASA/IPAC

Exemplo de uma galáxia onde a formação de hastes podem levar a compreensão de jatos. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

8. Estrelas Superpostas

Este é um típico caso onde estrelas projetadas contra o fundo de um halo galáctico podem produzir alguns efeitos, inclusive, os de jatos em certos objetos. No entanto, é importante ressaltar que alguns jatos síncrotrons estão fortemente dominados por regiões relativamente pequenas que parecem estelares em redshifts maiores do que 0,10. Por exemplo, o objeto localizado perto da galáxia Fairall 71 (ver Figura 3.8) interpretado como um jato de luz síncrotron (por Fricke, Kollatschny e Loose (1984)) é de aparência estelar. Por outro lado, o jato detectado em M87 e por pequenas regiões (condensações) que, a uma distância correspondente a $z \sim 0,05$, não seria resolvido a partir do solo. As galáxias compactas também podem produzir efeitos bem como os das estrelas.

Figura 3.8: Fairall 071



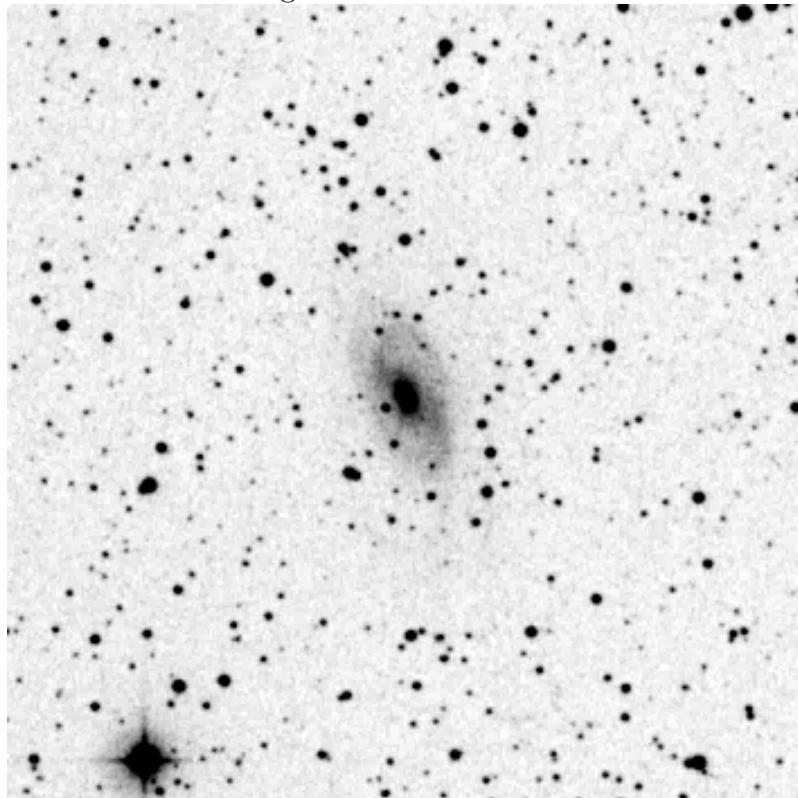
Fonte: NED-NASA/IPAC

Estrelas projetadas próximas ao campo podem produzir efeitos característicos de jatos. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

9. Artefatos Fotográficos

Este é um exemplo associado com os níveis de contraste, geralmente muito baixos em relação ao nível de fundo, onde os grãos de alguns tipos de emulsões fotográficas exibem. Por exemplo, a maioria dos candidatos de jatos relacionados por Vorontsov-Velyaminov (1966,1972) aparecem a partir da inspeção das placas fotográficas do Sky Survey, cujo brilho superficial é muito fraco. Características muito fracas, a menos que sejam bem grandes, devem, portanto, ser confirmadas em materiais de melhor resolução espacial. Alguns controles sobre este efeito podem ser exercidos observando o nível no qual as caudas não conectadas a qualquer coisa começam a aparecer na placa fotográfica. A combinação aleatória de um amontoado de grandes grãos e do gradiente de exposição acentuado presente em um envelope de galáxia, pode ser particularmente atraente e produzir uma imagem de jato muito convincente. Esse aspecto pode ser ilustrado na galáxia UGC 1378 (Figura 3.9).

Figura 3.9: UGC 1378



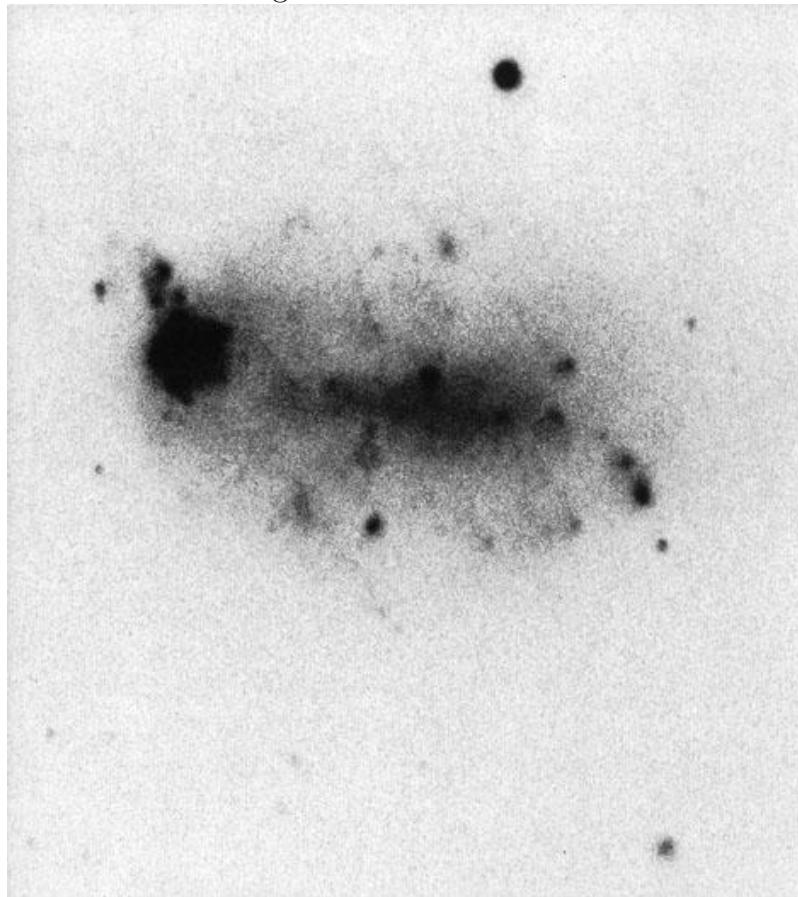
Fonte: NED-NASA/IPAC

Emulsões fotográficas de baixa razão sinal-ruído podem produzir artefatos nas imagens semelhantes a jatos. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

10. Galáxias com Estruturas Caóticas

De um modo simples, os jatos são, obviamente, mais fáceis de serem percebidos contra o fundo liso e regular de uma galáxia elíptica. Em espirais do tipo morfológico de Hubble intermediário ou tardio, a estrutura interna pode ser tão complexa ou desorganizada que os alinhamentos radiais de condensações são improváveis. Portanto, existem certos compromissos subjetivos a serem feitos na seleção de candidatos de jatos entre galáxias de tipo tardio. Existem dicas claras sobre a possível presença de um jato quando o material se estende para fora da estrutura galáctica visível ou aponta para um núcleo ativo. Os sistemas irregulares podem exibir uma estrutura semelhante a um jato, talvez produzida pela formação de estrelas de propagação. NGC 1602 é um exemplo deste cenário (Figura 3.10).

Figura 3.10: NGC 1602



Fonte: NED-NASA/IPAC

Determinadas estruturas produzidas por condensações internas podem levar a intrepretação de falsos jatos. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

3.2 Critérios Adicionais de Seleção

Além das descrições acima que ilustram algumas das possíveis maneiras de gerar um falso jato, também incluímos os seguintes critérios neste trabalho para excluir possíveis galáxias que apresentam falsos jatos:

1. Os verdadeiros jatos não devem apresentar mais do que alguns por cento da luminosidade óptica das galáxias hospedeiras. O valor de referência foi estabelecido em 0,03 (de acordo com [Keel 1985]). No entanto, para quantificar essa análise nas galáxias estudadas, valores para a razão de luminosidade foram obtidas diretamente da banda B, a qual possibilita uma análise dos componentes de maior energia.
2. Presença de jatos unilaterais ou muito assimétricos em intensidade óptica.

3. Possíveis extensões unilaterais ao longo dos principais eixos das galáxias (a: semi-eixo maior, e b: semi-eixo menor) com alto valor de inclinação ($i = \cos(b/a)$) são susceptíveis de serem braços espirais.
4. Comparaçāo do jato com a vizinhanāa próxima e o fundo do céu.
5. Com resolução angular suficiente para realizar uma medida, é possível obter uma proporção de 8:1[Keel 1985] para separar jatos e outros objetos.

Desse modo, a partir dos aspectos apresentados acima que caracterizam algumas possíveis formas e maneiras de gerar um falso jato, submetemos a uma análise visual as 256 galáxias peculiares extraídas de diferentes bancos de dados e bandas espectrais: SDSS (B), 2MASS (vermelho, J; poeira, K), WISE (infra-vermelho, 3.4 e $22\mu\text{m}$), e GALEX (ultravioleta próximo). Após uma análise sobre esse conjunto, 7 galáxias (cerca de 3%) foram então separadas para uma análise mais criteriosa, com o intuito de alocá-las (ou não) em alguma outra Categoria (15, por exemplo) do Catálogo de Arp & Madore. Das 249 galáxias selecionadas, foi possível extrair informações fotométricas de 201 (ver Apêndice A). Dessas, 125 apresentam espectros ópticos na literatura, as quais foram agrupadas em grupos de galáxias normais (52) e ativas (73), Apêndices B e C, respectivamente. Portanto, essa foi a seleção dos objetos que passaremos a realizar a modelagem com o código de síntese espectral STARLIGHT [Cid Fernandes et al. 2004, Fernandes et al. 2005, Asari et al. 2007]. Uma descrição da base de dados empregada nesse trabalho é apresentada no Capítulo seguinte.

Capítulo 4

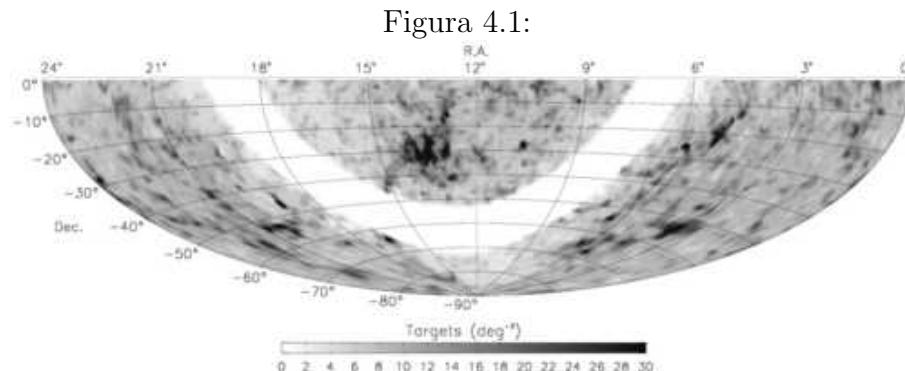
Amostra e Dados Observacionais

Conforme apresentado no Capítulo 3, os objetos analisados representam uma amostra de 125 galáxias, sendo 52 com linhas de absorção e 73 com linhas de emissão. Os espectros apresentados (i.e., disponíveis na literatura) foram extraídos do catálogo 6dFGS [Jones et al. 2004] e aquelas observadas no OPD/LNA-MCTIC (18 galáxias) serão usadas como controle. Os dados fotométricos foram obtidos de diversas fontes e incluem diferentes bandas espectrais: SDSS (B), 2MASS (vermelho, J; poeira, K), WISE (infra-vermelho, 3.4 e $22\mu\text{m}$), e GALEX (ultravioleta próximo). Uma compilação dessas informações podem ser vistas nos Apêndice B (espectros de absorção) e C (espectros de emissão), respectivamente.

4.1 Base de Dados 6dFGS (Six-degree-Field Galaxy Survey)

Para a análise visual dos espectros e levantamento estatístico dos dados, usamos os espectros da base 6dF Galaxy Survey (6dFGS), [Jones et al. 2004]. Trata-se de um levantamento espectroscópico do polo sul galáctico que visa fornecer posições e velocidades de galáxias situadas do Universo próximo. Quando completo, a pesquisa fornecerá aproximadamente 170 000 redshifts e 15 000 velocidades peculiares. A pesquisa utiliza o telescópio britânico Schmidt do Anglo Australian Observatory (AAO), o qual usa o posicionador de fibra robótica 6dF e o sistema de espectrografia. Até o presente momento, é o maior levantamento em redshift do Universo local e de velocidades peculiares. Quando completo, irá abranger todo o céu do sul em torno de um redshift médio de $z = 0,05$. A Figura 19 ilustra a distribuição desses objetos em coordenadas galácticas.

Para o polo sul galáctico, tal levantamento se torna importante uma vez que estudos espectroscópicos são escassos para esta região em relação ao norte. Um dos principais catálogos usados para o survey 6dFGS foi o do Two Micron All Sky Survey [Jarrett et al. 2000]. As principais vantagens para as escolhas de objetos nessas



Fonte: [Jarrett 2004]

Distribuição dos objetos 6dFGS em torno do polo Sul Galáctico.

bandas estão diretamente ligadas aos surveys de galáxias no óptico onde a distribuição de energia espectral (SEDs) é predominantemente composto por estrelas azuis jovens, sendo, portanto, fortes indícios de formação estelar recente. Outra razão está ligada ao fato das galáxias do tipo morfológico E/S0 representarem os melhores objetos para fornecer velocidades peculiares do plano fundamental, sendo a maior parcela de galáxia no infravermelho próximo selecionadas. Por fim, uma outra importante vantagem mostra que os efeitos da extinção de poeira são mínimos nos comprimentos de onda do infravermelho.

Um importante objetivo do 6dFGS, denominado "v-survey", consiste em obter dados homogêneos de velocidade-distância para análise das velocidades peculiares. De maneira abreviada, as velocidades relativas das galáxias no Universo possuem, além da componente associada à expansão, outra componente associada aos movimentos peculiares: $v = H_0 D + v_{pec}$. As velocidades peculiares são produzidas pelos campos gravitacionais locais que, por sua vez, se originam das flutuações de densidade locais. O catálogo Mark III contendo tais dados pode ser encontrado em [Willick et al. 1997].

O acesso aos dados foi feito mediante a submissão de uma tabela CSV com as posições dos objetos (ascensão reta e declinação, J2000.0) da Categoria 7 (objetos de estudo da presente pesquisa) do catálogo de Arp & Madore [Arp e Madore 1987] na base de dados no site do 6dFGS [Jones et al. 2009] utilizando o serviço "Xmatch form". Uma vez submetido, o retorno da tarefa oferece acesso aos espectros e as imagens referentes com as bandas JHK do 2MASS e B e R do UKST (United Kingdom Schmidt Telescope). Um script em Python também foi feito para automatizar o download dos objetos escolhidos. Isso se deve ao fato do site 6dFGS fornecer o download de apenas um objeto por vez.

Foram encontrados 125 espectros na base de dados 6dFGS, referentes a 225 objetos presentes na Categoria 7. Com esses objetos em mãos e com os programas feitos na linguagem Python, foi possível analisar visualmente como os objetos se comportam nas diversas bandas em relação aos espectros. Para este primeiro momento, tal

análise é importante pois tornar possível a separação quanto a atividade nuclear e o julgamento para caracterizar se os jatos e as galáxias associadas podem (ou não) pertencer a esta Categoria (ou serem migrados para a Categoria 15).

4.2 Identificação das Linhas de Emissão

A criação de um script que faça a distinção espectral entre galáxias normais e ativas (regiões HII ou Starburst e AGN - Active Galactic Nuclei - Seyfert e LINER (Low Ionization Nuclear Emission-line Region), seguem parâmetros simples que levam apenas em consideração informações específicas contidas no cabeçalho (header) das imagens FITS. Nele está presente informações como tempo de exposição, época de observação, posição do objeto, informações do espectro, dentre outros. As informações necessárias para a escrita do script se referem ao elemento de partida e valor de incremento do comprimento de onda. Com essas informações obtidas no cabeçalho, foi possível criar uma cópia do espectro para assim modelar e analisar cada valor em particular. O acesso aos elementos nos arquivos FITS do survey 6dFGS ocorre de forma simples, buscando os valores CRVAL1 e CDELT1 que correspondem ao valor de partida e incremento como descrito acima. Tendo em vista que a coluna referente ao comprimento de onda (\AA) não pode ser acessado, coube gerar então a coluna que o corresponda utilizando as informações CRVAL1 e CDELT1 e então analisá-lo paralelamente junto a coluna do fluxo. Uma vez criado o modelo do espectro, coube delimitar de maneira eficiente a região referente do comprimento de onda a ser calculado. Para isso, subtrai-se do valor inicial do comprimento de onda (CRVAL1) o valor 6560 \AA , que correspondente ao limite da região e o começo da região equivalente a linha de emissão $\text{H}\alpha$. Tendo em vista que para cada espectro o valor de incremento é diferente no comprimento de onda, pois cada galáxia possui um redshift diferente, dividi-se o valor obtido anteriormente pelo CDELT1, evitando assim flutuações nos valores delimitantes definidos. Sendo assim os valores serão sempre exatos para quaisquer espectro usado. Identificada a região do $\text{H}\alpha$, usamos o valor final mencionado anteriormente como o valor inicial para esta região. Quanto ao valor final, estimamos cinco pixels como média de término da gaussiana. De posse dos valores, o próximo passo foi comparar se o valor médio da primeira região é menor que a região do $\text{H}\alpha$.

O método utilizado emprega uma medida direta de comparação da média do fluxo e a média da região onde possivelmente existe a linha de emissão do $\text{H}\alpha$. O método utilizado a priori obteve uma pequena margem de erro ($< 2\%$), uma vez que analisamos apenas a linha de emissão do $\text{H}\alpha$ (com fraca intensidade em alguns casos), a qual normalmente caracteriza uma galáxia com atividade nuclear. Uma simples verificação visual resolve o problema.

Após as comparações, os arquivos FITS são então separados em duas pastas com seus respectivos tipos, normais e ativas. Este código pode ser empregado para qualquer

espectro 1d, sendo necessário apenas a mudança da região a ser estudada. Contudo, é importante salientar que existe uma pequena margem de erro, a qual depende da intensidade da linha escolhida. As razões para os erros estão relacionadas a vários fatores, mas, sobretudo, ao valor da razão sinal-ruído do espectro estudado, na qual depende, dentre outros fatores, da sensibilidade do detector CCD empregado na observação e das condições do sítio observacional.

4.3 Imagens Multibandas

Obter e analisar visualmente as imagens dos objetos estudados nas diversas bandas, representa uma tarefa fundamental para o nosso estudo, uma vez que estamos interessados em caracterizar a peculiaridade da Categoria 7: os jatos. Com esta finalidade, um programa Python foi escrito para criar para cada objeto de estudo uma figura com seis imagens contendo as bandas DSS2 Blue, 2MASS-J, 2MASS-k, WISE 3.4, WISE 22 e GALEX far UV. Tais imagens foram recolhidas através do serviço SkyView (<https://skyview.gsfc.nasa.gov/>) que falaremos a seguir.

Através de bibliotecas Python dedicadas a pesquisas astronômicas, é possível acessar, transferir e visualizar as imagens requisitadas no formato FITS. Para este fim, usamos o pacote Astroquery [Sipocz 2016]. Astroquery é um pacote filiado da Astropy [Robitaille et al. 2013], ou seja, um conjunto de ferramentas para consulta de formulários e banco de dados astronômicos. A Astroquery permite aos usuários acessar dados astronômicos on-line a uma extensa gama de fontes. Cada serviço astronômico da Web possui seu próprio sub-pacote para a interface com uma fonte de dados específica.

Para o acesso das imagens dos objetos, usamos o SkyView que oferece um serviço de recorte para uma série de consulta de imagens. Existem dois métodos principais para o uso do serviço: *get_images*, que faz a busca e realiza o download do arquivo, enquanto o *get_image_list* apenas procura pelo arquivo e retorna uma lista de resultados. Usamos o primeiro método, *get_images*, pois após o descarregamento ainda será necessário submetê-lo as tarefas seguintes do programa. Estão disponíveis em ambos os métodos alguns parâmetros onde é possível entrar com as configurações do objeto a ser acessado. A função principal escrita para o programa possui os seguintes parâmetros:

- Position: Determina o centro do campo para ser recuperado. Este parâmetro dá suporte as coordenadas, e os nomes dos objetos são convertidos em coordenadas através do resolvedor de nomes do bancos de dados, SIMBAD (simbad.u-strasbg.fr/) ou NED (<https://ned.ipac.caltech.edu/>). Ambas entradas devem ser do tipo "string". Usamos como entrada as coordenadas presentes no arquivo CSV através da função SkyCoord no formato equatorial e já convertidas para a época padrão J2000.0 através do serviço de conversão do

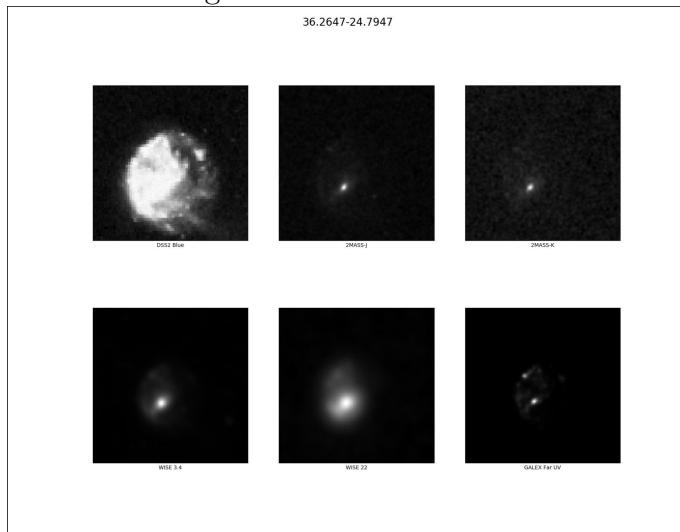
Vizier (vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR), uma vez que o catálogo de Arp & Madore estão posicionados para J1950.0;

- SkyCoord: Essa função é usada como ferramenta auxiliar na entrada das coordenadas para a função "Position", pois fornece uma interface flexível para a manipulação e transformação de coordenadas celestes. Através dele, é possível a submissão de uma ou mais coordenadas que podem ser listas, duplas e arrays, produzindo coordenadas escalares ou de matrizes. Na função Skycoord usamos também alguns parâmetros disponíveis necessários:
- Frame: Este é o tipo de coordenada que o SkyCoord deve representar. Usamos o Sistema Internacional de Referência Celeste (ICRS, na sigla em inglês) como padrão;
- Unit: Unidades para os valores LAT e LON (coordenadas geográficas), recuperadas anteriormente; Obstime faz referência à data de observação;
- Survey: Lista dos surveys de interesse;
- Pixels: Aqui passamos as dimensões em pixels da imagem a ser produzida. Usamos o padrão 300 x 300. O sistema de coordenada escolhido é o equatorial J2000.0.

Como usamos apenas as imagens como forma de comparação visual, atribuímos aos parâmetros "grid" e "gridlabels" o valor "False", pois não se faz necessário neste caso. Para produzir uma imagem para cada banda, chamamos a mesma função com as mesmas configurações, exceto o parâmetro "survey", onde usamos para cada imagem criada uma entrada diferente.

Usamos as bibliotecas do Matplotlib como Subplot2grid para cuidar da plotagem de forma dinâmica. A vantagem para seu uso se dá pela fácil manipulação. Sendo assim a customização e criação de subplots é feita de forma mais eficiente e de melhor manutenção para revisões e estudos futuros. Após as transferências, os plots gerados com o Subplot2grid são salvos como imagens em uma pasta previamente criada através do programa para este fim. Um exemplo é ilustrado na Figura 4.2.

Figura 4.2: AM 0222-250



Fonte: Próprio Autor
Imagen gerada das diversas bandas da galáxia AM 0222-250

4.4 Espectros e Multibandas

Em adição aos programas anteriores, um outro programa foi escrito visando mostrar, em conjunto com as imagens nas bandas fotométricas, os espectros disponíveis da base 6dFGS. Um dos objetivos para a geração das imagens em conjunto com os espectros é justificado pela relação que as galáxias possuem com os diferentes filtros observados. Parte do código segue a metodologia descrita acima para gerar as imagens. Uma vez que os surveys são acessados através das coordenadas do arquivo em CSV, o algoritmo compara como números inteiros as posições RA e DEC com as posições encontradas no cabeçalho do arquivo FITS. Esse método se torna necessário pois as conversões feitas pelo Vizier para a época J2000.0 não estão totalmente calibradas, tendo uma pequena diferença nos números flutuantes. Tal comparação obteve sucesso, uma vez que a quantidade de posições presentes no catálogo é relativamente pequena, não havendo semelhança entre eles.

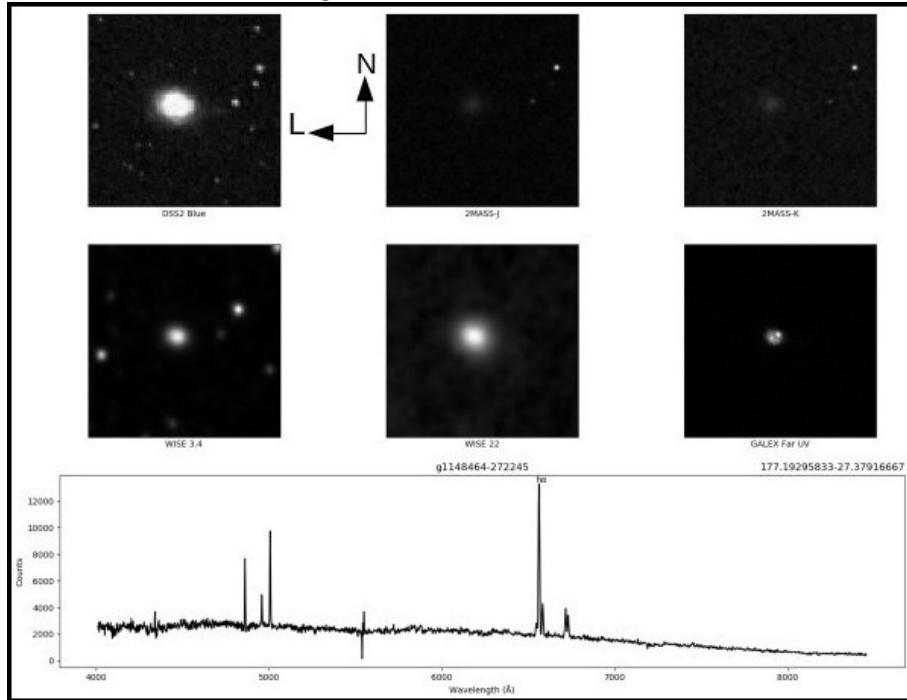
Gerar as imagens dos espectros segue também parte do método empregado na identificação das galáxias ativas. Usamos as informações contidas nos “headers” dos arquivos FITS onde contém o valor CRVAL1 e CDELT1 que corresponde a partida do fluxo e do incremento, respectivamente. Acessamos também as colunas correspondentes ao fluxo de cada espectro. Os espectros gerados em nada diferem do original, tendo em vista que cada pixel é reproduzido fielmente seguindo os requisitos descritos anteriormente.

Para facilitar a identificação das principais linhas de emissão nas bandas do visível e do infravermelho próximo, foram feitas marcações nas áreas já conhecidas da pri-

meira coluna correspondente ao comprimento de onda, tal como feita na marcação da linha do H α . Cada área marcada corresponde ao começo e o fim de cada gaussiana. Uma vez marcada as áreas de interesse, restou definir em uma variável cada valor máximo de cada área. Por conseguinte, na função de plotagem *subplot2grid* definimos no parâmetro *annotate*, as variáveis que contém os valores máximos de cada linha de emissão extraídos de cada fluxo para então marcar tal linha com a determinada identificação química.

De posse dessas informações integradas, imagens e espectros, concluímos então a nossa amostragem de estudo. A Figura 4.3 ilustra esse procedimento final. É possível perceber na imagem da banda B do DSS2, a presença de um fino jato a direita do objeto (direção Oeste), provavelmente associado com a componente nuclear que deve ser bastante energética. Por outro lado, as imagens do 2MASS nas bandas J e K apontam, respectivamente, a presença de poucas estrelas velhas e de poeira, porém, sendo mais intensas nas bandas exploradas pelo WISE. Com o GALEX, é possível reconhecer duas subestruturas de altas energias, que podem ser claramente um processo de fusão dos núcleos de duas galáxias, dada a evidência das intensas linhas de emissão no espectro representado. Esse resultado pode ser um importante indício para a presença do jato nesse objeto peculiar.

Figura 4.3: AM 1146-270



Fonte: Próprio Autor

Imagens das bandas e do espectro da galáxia peculiar AM 1146-270. A direção Norte está para cima, e a direção Leste para a esquerda.

Embora o resultado obtido acima advindo de uma possível fusão de duas galáxias

possa fomentar uma interessante conclusão, é necessário que façamos primeiro uma análise do jato observado na banda B do DSS2. Lembramos que muitos objetos presentes na Categoria 7, definidos por Arp e Madore, podem não conter o jato, sendo, por exemplo, um filamento, cauda, laços de matéria ou detritos (Categoria 15). Alguns métodos são óbvios, mas estão incluídos para garantir a completude deste trabalho.

Um outro aspecto da metodologia está relacionada com a modelagem espectral das galáxias analisadas via o código de síntese espectral STARLIGHT ([Cid Fernandes et al. 2004, Fernandes et al. 2005, Asari et al. 2007]), onde esperamos obter alguma conclusão que possa contribuir para a compreensão dessa característica peculiar observada.

Capítulo 5

Sistema Web

Os objetos de estudo aqui investigados apresentam em seus resultados poucas conclusões, seja no campo da espectroscopia, quanto na fotometria, seja quanto ao numero de objetos levantados nos bancos de dados, ou nenhum esclarecimento considerável relacionado aos parâmetros físicos associados aos jatos desta natureza. Dessa maneira, torna-se necessário a busca de novos objetos, novos estudos relacionados para o trabalho contínuo da pesquisa. Diante deste contexto, um sistema foi desenvolvido a fim de reunir os dados dos objetos bem como contemplar aqueles que carecem de informações. Deste modo, o cadastro de novos objetos da categoria estudada, poderá ser, em um só sistema, catalogados. Outro importante objetivo é fornecer a comunidade científica de forma concentrada as informações necessárias para a compreensão das Galaxias Peculiares com Jatos no visível. Para contemplar este objetivo, um sistema Web será adotado.

Nesse capítulo apresentamos as principais ferramentas envolvidas que colaboraram com o desenvolvimento do sistema. É certo que, no campo relacionado ao desenvolvimento de sistemas, a gama de ferramentas e linguagens se estende. A escolha das linguagens aqui apresentadas, justifica, para um primeiro instante, sua consolidação e robustez. Uma dessas linguagens aqui empregadas é o PHP que em servidores Web é a linguagem que ainda domina [Hills et al. 2013].

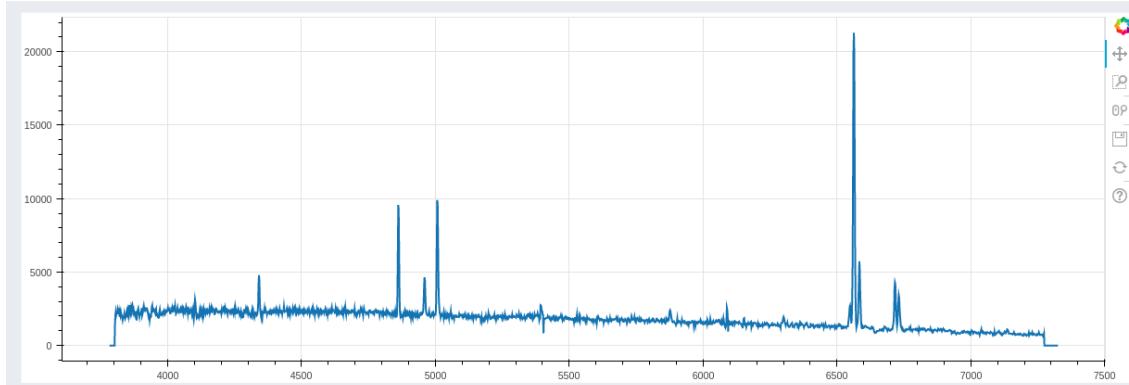
Logo, para o desenvolvimento do sistema utilizaremos as tecnologias Web, HTML, CSS, PHP e Javascript. A linguagem que assegura a criação de páginas Web é a linguagem de marcação HTML (do inglês Hypertext Markup Language). É através dela que as páginas são estruturadas e o conteúdos organizados. Isso é possível mediante o uso de 'tags'. Com isso, parágrafos, tabelas e títulos são criados e posicionados. São por meio das 'tags' que o corpo da página é formatado. Um banco de dados também foi modelado e construído utilizando o Sistema Gerenciador de Banco de Dados Mysql e o servidor Web Apache.

Para o site, um layout foi construído, levando em consideração os requisitos planejados para o sistema, a qual falaremos na seção 5.2. Originalmente o conteúdo do

website foi escrito na língua inglesa, de modo que o mesmo tenha uma maior inserção no campo acadêmico. Deste modo o website provém de seções em um menu que dispõe ao usuário módulos do sistema onde encontram-se formulários de consulta para os objetos de interesse. Para os objetos que ora dispomos, um total de 125 espectros já foram inseridos no banco de dados de forma automática. Para tal, uma pré-modelagem foi montada e um ambiente no site criado para inserí-los. Como o objetivo do sistema é, justamente fornecer a comunidade pesquisas relacionadas aos objetos, tratamos de oferecer em primeira mão, as informações fotométricas que anteriormente foram produzidas segundo os Capítulos 4.3, 4.4 e os espectros tratados e corrigidos por redshift. Todos os arquivos foram carregados no Banco de dados via PHP para o gerenciador Mysql. Uma vez carregados, o sistema dispõe todos os arquivos via pesquisa montados em formulários Web.

Mediante este objetivo descrito acima, foi percebido a necessidade de, também, modelar o sistema e disponibilizar todos os dados de forma dinâmica. Para todos os objetos, 'Bokeh', uma biblioteca da linguagem Python, gera plots para cada espectro. Deste modo, além das informações, referências, posições disponíveis ofertadas pelo sistema, o mesmo contempla também plotagens dos espectros disponíveis no banco de dados. Cada plotagem é gerada de forma dinâmica, na própria página de conteúdo, não se fazendo necessário gerar para cada objeto um plot salvo em banco. Uma característica didática, presente no sistema de plotagem 'Bokeh', se refere a função que permite ao usuário interagir com o gráfico, podendo dessa forma, investigar no próprio site, posições ou áreas específicas do espectro via Web. A imagem abaixo ilustra um exemplo:

Figura 5.1: Plot no Sistema



Fonte: Próprio Autor

Plotagem de um espectro gerado pelo Bokeh, uma biblioteca de gráficos feita em Python

Para a busca dos objetos, seja relacionado as informações fotométricas ou espectroscópicas, duas seções foram criadas para tal pesquisa. Dois modos foram disponibilizados para a pesquisa, sendo a primeira pelo nome do objeto, devendo ser o

nome originalmente catalogado por Arp & Madore. O segundo modo pode ser feito via pesquisa de posições em coordenadas equatoriais (ascensão reta e declinação). A pesquisa retorna uma imagem semelhante a figura 4.2 ou 4.3 respectivamente. Além deste, também uma lista de parâmetros e referencias ligada ao objeto será apresentada. Tais parâmetros foram cadastrados via formulário web. O resultado apresenta os seguintes parâmetros:

- Referencias - Artigos e produções bibliográficas de estudo do objeto, no formato bibtex, e um link para cada fonte publicada;
- Redshift - Valor referente ao desvio para o vermelho;
- Magnitude – Medida do brilho dos objetos na qual um aumento de uma magnitude indica uma diminuição no brilho por um fator 2,512, nas diversas bandas fotométricas;
- Classificação – Referente ao tipo morfológico do objeto.

Referente as pesquisas relacionadas à espectroscopia, uma seção também foi criada chamada “Database” onde, da mesma forma que fizemos para a pesquisa fotométrica, podemos também empregar esta página. Neste caso, a saída será um objeto para download no formato FITS, as posições e um botão para o plot do espetro.

5.1 Cadastro de Usuários

Para o gerenciamento do sistema, empregamos um modo de cadastro de usuários que, desta forma, poderão se cadastrar e editar o conteúdo. Para o cadastro, um script em PHP foi escrito para validar e receber os valores passados. Para as validações, é exigido para o cadastro, um email e senha com um número mínimo de caracteres. Para o email, este será apenas válido se contiver caracteres obrigatórios como “@” e o ponto. Já para cadastrar novos usuários, um sistema de token foi desenvolvido, visando o controle de participantes no sistema. Para tal, uma função feita também em PHP foi escrita para gerar números e letras de forma aleatória. Uma vez feito isso, o administrador poderá compartilhar com o usuário de interesse e efetuar o cadastro. Isso evita usuários indesejados e de forma segura manter a integridade do sistema. Dessa forma o administrador manterá o controle e demais pessoas contribuirão com o trabalho, em publicações e atualizações.

Uma vez que um usuário é cadastrado, uma tupla¹ (ou seja, uma lista imutável) é gerada no banco de dados. No que segue, apresentamos um exemplo da função em PHP que, quando conectado ao banco de dados, enviará comandos SQL para a execução de um novo usuário no sistema:

¹Basicamente, o que diferencia a ‘Estrutura de Dados Lista’ da ‘Estrutura de Dados Tupla’, é que a primeira pode ter elementos adicionados a qualquer momento, enquanto que a segunda estrutura, após definida, não permite a adição ou remoção de elementos.

5.2 Análise de requisitos

Os requisitos do sistema se referem as funções, atividades e processos que contemplam as necessidades do projeto para o sistema durante seu desenvolvimento até sua conclusão. Em geral, os requisitos são classificados em dois modos: o primeiro de cunho funcional, isto é, que define exatamente o que o sistema deverá fazer e como deve se comportar diante da necessidade do usuário, enquanto o segundo deverá levar em consideração propriedades referentes à segurança, portabilidade, desempenho e usabilidade. Abaixo estão listados os requisitos citados:

Requisitos Funcionais:

- RF1: O sistema permite o acesso ao download dos arquivos sem comprometer a segurança do sistema;
- RF2: O sistema deve ser capaz de aprovar novos usuários via tokem;
- RF3: O sistema deve ser capaz de enviar dados ao BD;
- RF4: O sistema deve ser capaz de exibir os dados requeridos pelo usuário como as imagens, espectros, plots dos espectros e fontes de cada dado;
- RF5: O sistema deve ser capaz de efetuar login e cadastrar novos dados;
- RF6: O sistema deve ser capaz de gerar arquivos bibcode.txt referente a cada objeto contendo suas devidas referencias.
- RF7: A interface gráfica Web deverá ser responsiva, permitindo ajuste do layout automático para diferentes tamanhos de tela.

Requisitos Não Funcionais:

- RNF01: O sistema deve ser de fácil entendimento e usabilidade para professores e alunos;
- RNF02: O sistema deve ser capaz de funcionar em qualquer ambiente, como celulares e tablets;
- RNF03: A aplicação deverá estar disponível na língua inglesa;
- RNF04: O sistema poderá ser atualizado sempre que necessário;

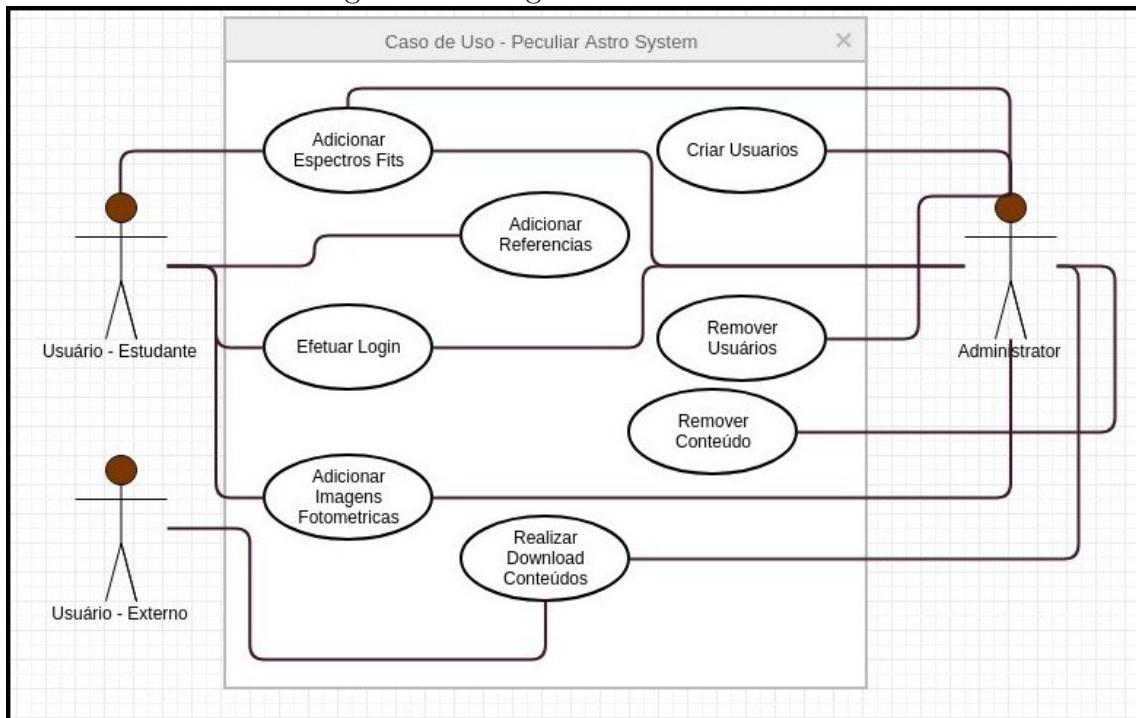
5.3 Modelagem do Sistema

Para elaborar a documentação, construir suas etapas visualizar os procedimentos necessários de forma lógica, submetemos o processo de sua construção os procedimentos da modelagem UML, que é a linguagem padrão para a elaboração de projetos. Dessa forma é possível padronizar os passos e estruturas que um sistema requisita.

5.3.1 Diagrama de Caso de Uso

Diagrama de caso de uso representa em alto nível como o sistema deverá se comportar em relação a um determinado indivíduo, chamado usualmente de 'Aтор'. De forma direta, documenta o que o sistema faz em relação ao usuário e suas interações. Ele busca apresentar na perspectiva do usuário, as funcionalidades e recursos do sistema. O diagrama (ver figura 5.2) foi montado no inicio da modelagem do sistema, juntamente com a análise de requisitos.

Figura 5.2: Diagrama de Caso de Uso



Fonte: Próprio Autor
 Diagrama representando relação de autores e funções do sistema

5.4 Modelagem do Banco de dados

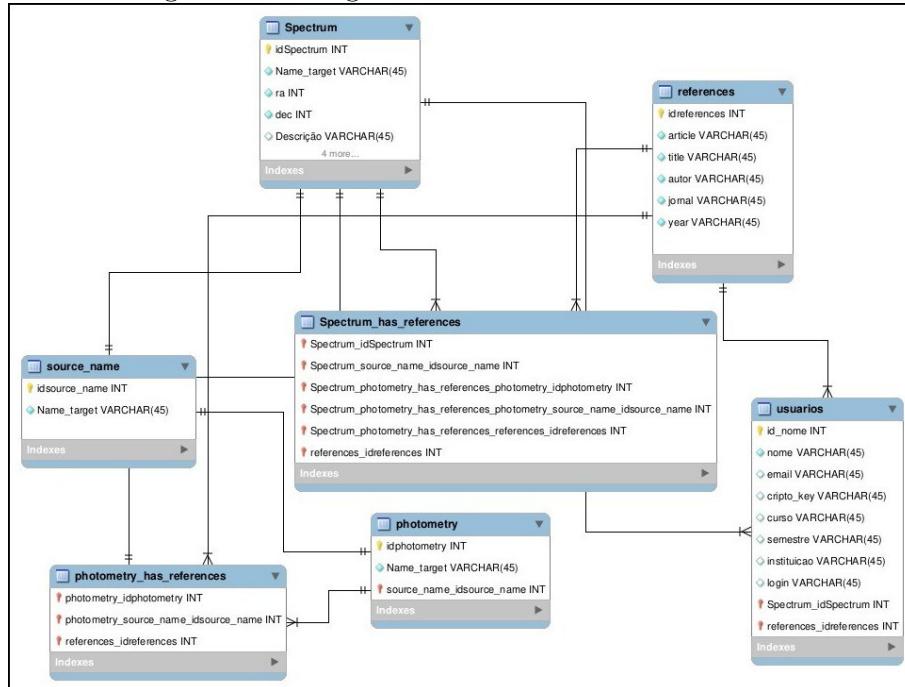
A modelagem do banco de dados foi baseado no modelo Entidade Relacionamento (MER). Dessa forma, podemos descrever os objetos (Entidades) envolvidos no projeto, bem como também suas características. A ideia do modelo, permite, de forma objetiva, estabelecer o relacionamento entre as entidades e as características que este apresenta. Neste modelo cada registro de tabela é distinto de todos os outros, e suas relações estabelecidas mediante um tipo de atributo, chamada 'chave primária', que pode ou não relacionar as tabelas. É mediante tal modelo que, de forma

abstrata, qual forma e estrutura a aplicação do sistema terá. Tais relacionamentos foram representados mediante o 'Diagrama Entidade-Relacionamento'.

5.4.1 Diagrama de Entidade-Relacionamento

O diagrama de entidades consiste de 7 tabelas e com o auxílio do software 'Mysql Workbench', o diagrama do banco de dados foi montado. Nesta ideia, o sistema poderá guardar os dados de forma estruturada e organizada e onde todas as tabelas estão relacionadas. A seguir a figura ilustra o diagrama:

Figura 5.3: Diagrama Entidade-Relacionamento



Fonte: Próprio Autor

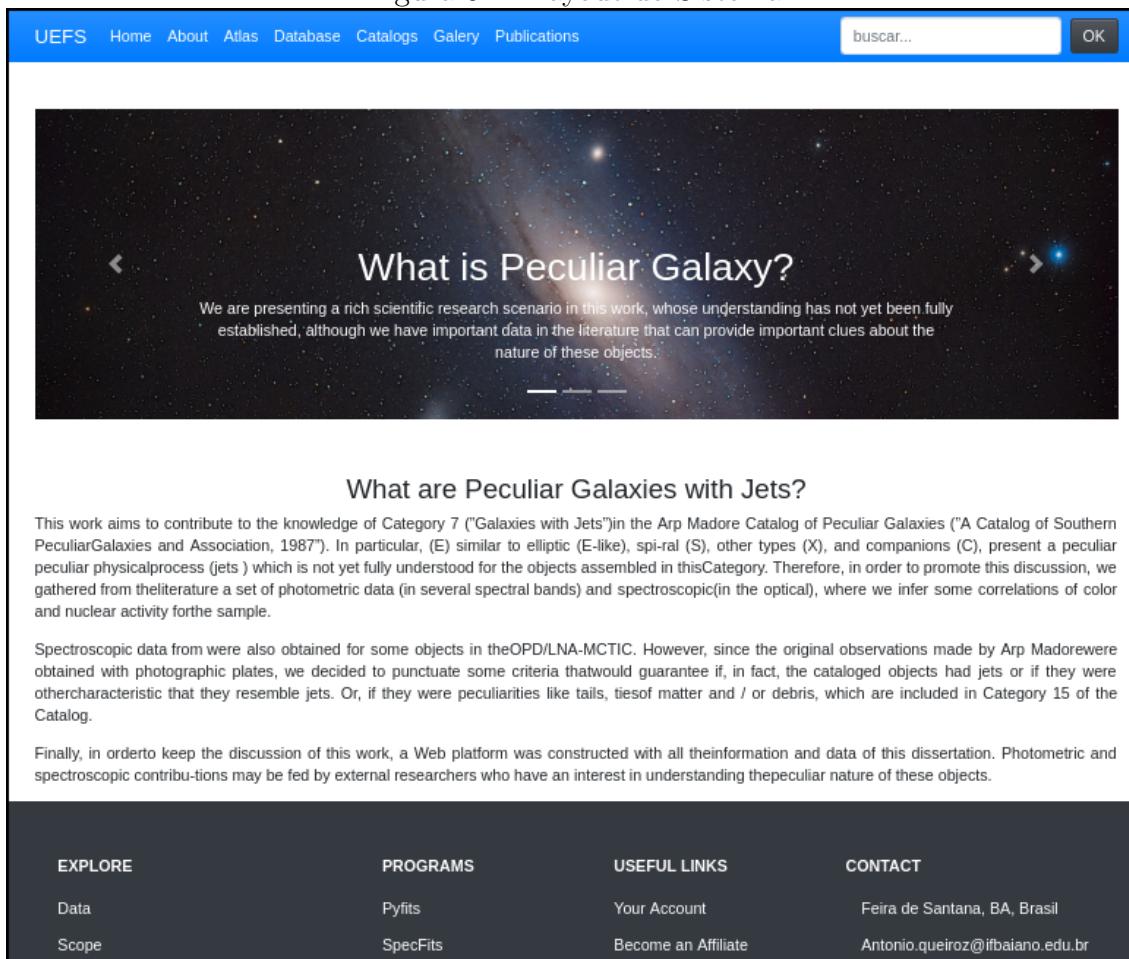
Diagrama representando as principais tabelas e como estão conectadas.

5.5 Desenvolvimento Front-end

Quando falamos em Front-end, nos referimos ao desenvolvimento dos componentes subjacentes para o fornecimento da interface ao usuário. É através dele que trabalhamos o layout, design e apresentação de um sistema web ou aplicativo. No caso específico desta pesquisa, usamos uma coleção de ferramentas, 'frameworks' e algumas linguagens de programação para trabalhar na estrutura lógica do comportamento das funções do sistema para o usuário. Uma das tecnologias Web envolvidas nesse projeto foi a linguagem Javascript. Com ela é possível trabalhar no nível

”Client-side”, ou seja, rodar processos que são executados no computador do cliente, mais especificamente no ’browser’, executar estruturas de programas, fazendo da página um ambiente inteligente. Para o menu principal, slides e roda-pé, o uso de um framework Web chamado ’Bootstrap’, foi usado para gerar de forma intuitiva cada parte destas seções. Um framework é uma abstração que une códigos e projetos para promover uma funcionalidade. Neste caso, o Bootstrap une a linguagem de marcação HTML, linguagem de folhas de estilo CSS, e Javascript, tornando assim a página fluida, dinâmica e responsiva. Responsividade, como citado anteriormente, é uma técnica usada através da linguagem CSS para manter a ordem e organização de como as partes do site se moldam de acordo com uma plataforma. Com o advento das plataformas mobile, o uso de sites por meio de celulares e tablets forçou no desenvolvimento dessa tecnica através do recurso conhecido como ’media queries’ do CSS. Neste caso o sistema desenvolvido neste projeto pode ser usado não só em computadores comuns, mas nas diversas plataformas encontradas. O Bootstrap unindo essas linguagens, nos permitiu desenvolver toda a parte gráfica do sistema de forma rápida e eficiente, poupando o desenvolvimento de massivas linhas de código. A imagem a seguir ilustra como essa parte do sistema se encontra até o momento.

Figura 5.4: Layout do Sistema



Fonte: Próprio Autor
 Página inicial do site

5.6 Desenvolvimento Back-end

De forma superficial, podemos já vislumbrar como o sistema se apresenta visualmente ao usuário. Porém, as estruturas e tarefas que não são controladas nem visíveis pelo usuário, é chamado de desenvolvimento Back-end. Esta parte é onde cuidaremos do banco de dados, como o sistema coleta os dados, e como são computados. Uma das linguagens usadas para a construção dessa aplicação foi o PHP (acrônimo recursivo do inglês: Hypertext Processor), uma linguagem open source, com a capacidade de inserção de seus códigos em páginas HTML. Através dela, conectamos ao Mysql, inserimos os dados ao banco ou consultamos valores. O Mysql é um SGBD (Sistema Gerenciador de Banco de Dados). O motivo de sua escolha se dá pela fácil implementação, fácil acesso, interface simples e protegido sob licença de software livre, desenvolvida pela GNU. Para a implementação do sistema usamos

o servidor HTTP Apache que é responsável por disponibilizar páginas e todos os recursos para os usuários.

5.7 Implantação do Sistema

As tecnologias envolvidas na implementação do sistema, já são, de certo modo, consagradas por grande parte da comunidade tecnológica. Após o sistema criado e boa parte de seus módulos em funcionamento, restou então, colocá-lo em uma plataforma de hospedagem e disponibilizar seu conteúdo. Sendo assim, o serviço de hospedagem usado é o Webhost, que oferece suporte ao PHP, Mysql suas tecnologias e também sendo possível hospedar um sistema gratuitamente. Desta forma, pelo endereço <https://astrouefs.000webhostapp.com/> é possível acessar o site. O endereço e domínio agora citado está apresentado provisoriamente, e deverá ser mudado assim que um novo domínio for adquirido.

Capítulo 6

Populações Estelares Simples

6.1 Uma Visão Geral

Historicamente, a definição que ora empregamos de população estelar foi proposta inicialmente por um astrônomo e astrofísico dos Países Baixos, Jan Oort [Oort 1926], e posteriormente refinada por um astrônomo e astrofísico alemão, Walter Baade (Baade 1944), analisando os espectros das galáxias M31 e M32. Como conclusão, Baade percebeu que estes objetos consistem de uma mistura de dois tipos diferentes de estrelas, nomeados de população do tipo I e população do tipo II.

A primeira é constituída por estrelas jovens com idades menores que 7×10^9 anos, ricas em metais e que apresentam órbitas aproximadamente circulares. Estrelas dessa classe são encontradas na estrutura de disco das galáxias espirais. Esse tipo de população apresenta diagrama cor-magnitude semelhante àqueles observados para aglomerados estelares abertos. Já o segundo tipo é constituído por estrelas com idades em torno de 10×10^9 anos ou da ordem da idade do Universo. São localizados preferencialmente no halo e bojo de galáxias espirais e galáxias elípticas. Podem ser pobres se estiverem localizadas no halo, ou ricas em metais se estiverem presentes no bojo. Esse tipo de população estelar apresenta diagrama cor-magnitude semelhante aos observados para aglomerados globulares estelares.

Essa análise revela um resultado muito importante, pois permite caracterizar quais são os tipos de populações predominantes na classificação morfológica de Hubble (ver Figura 1). Nesse sentido, temos:

Galáxias Elípticas: consistem predominantemente de estrelas da População II;

Galáxias Lenticulares: seguem, geralmetne, o padrão da elípticas;

Galáxias Espirais: apresentam uma mistura de Populações I e II, as quais estão presentes nas regiões de disco e bojo/halo, respectivamente;

Galáxias Irregulares: apresentam em maior quantidade estrelas de População I.

No entanto, nada podemos dizer sobre as galáxias peculiares, pois não fazem parte dessa construção morfológica inicial. No entanto, como a nossa amostra espectral revelou tanto espectros de absorção quanto de emissão, é razoável supor que os dois tipos de populações estejam presentes ao final da síntese espectral. Na verdade, essa será a primeira discussão mais abrangente sobre as características populacionais nas galáxias com jatos presentes na Categoria 7 do Catálogo de Arp & Madore.

Para o estudo da síntese espectral das galáxias selecionadas com jatos, iremos dividir as populações estelares usando como critério de diferenciação as respectivas idades. Nesse sentido, teremos:

Grupo 1. Extremamente jovens, com idades menores que 1 bilhão de anos, de modo que o "turn-off" (equivalente ao ponto de saída da sequência principal da população estelar correspondente), esteja próximo do tipo espectral A0. Em termos de massa (M_{\star}), corresponde a valores superiores a $2,4 M_{\odot}$;

Grupo 2. Jovens, com idades entre 1 e 4 bilhões de anos, de modo que o "turn-off" da população correspondente esteja localizado entre os tipos A0 e F5, correspondendo ao intervalo de massa $2,4M_{\odot} < M_{\star} < 1,25M_{\odot}$;

Grupo 3. Idade intermediária, com valores entre 4 e 10 bilhões de anos, de modo que o "turn-off" da população se localize entre os tipos F5 e G5, o que equivale a $1,25M_{\odot} < M_{\star} < 1,00M_{\odot}$;

Grupo 4. Velhas, com idades entre 10 e 14,5 bilhões de anos, com o "turn-off" entre $0,90M_{\odot} < M_{\star} < 1,00M_{\odot}$.

Aprendemos por exemplo, [Maciel 1999] que as estrelas são, teoricamente, formadas de modo simultâneo a partir de um mesmo fragmento de nuvem de gás e poeira em contração, no qual apresenta uma composição química relativamente uniforme. Na verdade, consideramos que todas as estrelas formadas de diferentes massas iniciam suas evoluções simultaneamente na Sequência Principal de Idade Zero (ZAMS: Zero Age Mean Sequence). Assim, consideramos que a estrela começa seu tempo de vida sobe a Sequência Principal quando alcança a ZAMS. No que segue, usaremos o termo SP para a Sequência Principal.

Na literatura, uma "População Estelar Simples" (daqui para frente, SSP: Simple Stellar Population), consiste, basicamente, de um conjunto de estrelas que apresentam idades e metalicidades bem definidas. No entanto, para a construção de um modelo de uma SSP, é necessário o conhecimento de seus caminhos evolutivos para diferentes massas iniciais, composição química e função de massa inicial (IMF: Initial Mass Function), que é a função que expressa ou representa a distribuição numérica de estrelas por massa. Existe ainda a necessidade de termos o conhecimento das chamadas "Bases Estelares", "Trajetórias Evolutivas" e a "Função de Massa Inicial". As bases representam grandes conjuntos de espectros que podem ser tanto empíricos como sintéticos. Possuem uma vasta abrangência em massa, idade e metalicidade, com diversos valores de temperatura e luminosidade, o que permite distribuir as estrelas de forma homogênea por todo o diagrama HR. No que tange as trajetórias

evolutivas, conhecemos da teoria de evolução estelar que o tempo de vida de uma estrela isolada na SP e a respectiva trajetória no diagrama HR pós-SP, dependem, principalmente, da sua massa inicial de partida. Desse modo, quanto maior for a massa estelar, mais luminosa será a estrela na ZAMS, e mais rápida será a evolução. No que concerne a metalicidade, quanto menor, mais curto será o tempo evolutivo da estrela.

6.2 A Síntese de População Estelar

A investigação proposta neste trabalho está pautada na síntese de população estelar das galáxias obtidas na literatura e aquelas observadas no OPD/LNA-MCTIC. De forma resumida, as diferentes técnicas existentes podem ser classificadas em duas linhas: (i) síntese de população estelar evolutiva e (ii) síntese de população estelar semi-empírica. O primeiro procura comparar os dados observados da galáxia com modelos que seguem a evolução de um sistema estelar inteiro, através da combinação de bibliotecas com caminhos evolutivos e espectros estelares. O segundo utiliza a informação contida nos espectros como descritos em Kennicutt [Kennicutt 1998], como elementos de partida para se extrair as populações estelares existentes. Ambas técnicas apresentam vantagens e desvantagens, e diferenças em relação ao conjunto de observáveis que são sintetizados.

A comparação entre os dados observacionais e os modelos gerados é realizada em termos dos chamados “índices espetrais”, i.e., larguras equivalentes de linhas de absorção com emissão e cores (razões de fluxo em diferentes comprimentos de onda). Nesse sentido, os índices de Lick¹ [Trager et al. 1998] e os definidos por [Bica 1988] estão entre os mais usados para fins de síntese espectral. Porém, embora contenham importantes informações espetrais, tais índices são, infelizmente, uma versão resumida do espetro real observado. Logo, é desejável que a comparação entre observação e modelo seja feita para todos os comprimentos de onda, pixel a pixel. Este trabalho se dedica a tal estudo, através da síntese de população estelar semi-empírica STARLIGHT (SEAGal - Semi-Empirical Analysis of Galaxies), Cid Fernandes et al. ([Cid Fernandes et al. 2004, Fernandes et al. 2005, Fernandes et al. 2007]).

Em décadas anteriores, a maneira empregada para se obter informações relativas às componentes das populações estelares nas galáxias, classificadas de acordo com o grupo definido acima, em muito jovens, x_{Mj} ($t \leq 1 \times 10^8$ anos), jovens, x_J ($1 \times 10^8 < t \leq 5 \times 10^8$ anos), de idades intermediárias x_I , ($5 \times 10^8 < t \leq 2 \times 10^9$ anos) e velhas x_O ($t > 2 \times 10^9$ anos), por exemplo, era realizada por meio da comparação direta de índices de linhas de absorção medidos no espetro integrado do sistema contra previsões de grades de modelos de populações estelares simples, mais especificamente os índices espetrais de Lick [Trager et al. 1998]. No entanto, uma maneira alternativa pela

¹O sistema de índices de Lick foi definido por [Faber et al. 1985], e consta de um conjunto de características espetrais no intervalo óptico de 4000-6400 Å.

qual se pode obter informações acerca da mistura de populações estelares (e suas distribuições de composição química e idade), é feita através da análise “ponto a ponto” de todo o espectro integrado emitido pela galáxia, no caso da mesma não ter suas estrelas/subestruturas resolvidas angularmente. Porém, esse tipo de análise não é trivial, tendo em vista que não é possível identificar espectros estelares individuais a partir do espectro galáctico observado. O que temos, na verdade, é uma contribuição integrada do conjunto de estrelas presentes na galáxia (populações estelares que as compõem), sendo natural que cada população estelar apresente valores diferentes de idade e metalicidade.

6.3 O Código STARLIGHT

Adotamos para esta análise o código de síntese espectral STARLIGHT (SEAGal - Semi-Empirical Analysis of Galaxies), com o fim propósito de verificar como essas propriedades variam e dessa maneira inferir possíveis cenários de formação dessas galáxias peculiares, construindo pistas para caracterizar o jato observado nas mesmas. Trata-se, basicamente, de um código de síntese de populações estelares, desenvolvido em linguagem Fortran 77, que faz o ajuste de um espectro sintético, definido como M_λ , a um espectro observado de um sistema estelar, definido como O_λ .

Acrescentamos também análises de cinemática estelar para inferir sobre o estado dinâmico de cada galáxia e, deste modo, contribuir para obter um retrato mais completo acerca de um possível cenário de formação de cada galáxia da amostra. Aspectos geométricos como a inclinação na linha de visada, razão axial, excentricidade e elipticidade, quando possíveis, também serão abordados neste projeto. Todos os dados espectrais possíveis serão analisados à luz das informações fotométricas disponíveis na literatura. Os bancos de dados extragaláticos, NED/NASA-IPAC (<https://ned.ipac.caltech.edu/>) e HyperLeda(<http://leda.univ-lyon1.fr/search.html>), serão empregados no levantamento.

Basicamente, o método baseado no STARLIGHT consiste em modelar um espectro observado O_λ usando uma combinação linear com coeficientes positivos dos elementos de uma base, que pode ser constituída tanto por observações (estrelas ou combinações de estrelas) ou por modelos teóricos (estrelas e populações estelares empíricas) de diferentes idades e metalicidades. Uma gaussiana é incluída para dar conta da cinemática e um termo para a extinção por poeira, de acordo com a equação:

$$M\lambda = M_{\lambda 0} \left[\sum_{j=1}^{N_s} x_j T_j, \lambda r \lambda \right] \bigotimes G(v_s, \sigma_s)$$

onde M_λ é o espectro sintético e $M_{\lambda 0}$ um fator de normalização, definido como o fluxo total de M_λ no comprimento de onda λ_0 ; $T_{j,\lambda}$ representa o espectro da j-iésima

componente da base, normalizado em λ_0 ; x_j é a fração com que cada elemento $T_{j,\lambda}$ da base contribui para o fluxo de M_λ ; $r\lambda \equiv 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$ leva em conta os efeitos de extinção por poeira. $G(v_s, \sigma_s)$ é uma distribuição gaussiana de velocidades na linha de visada, centrada em v_s e alargada por σ_s . O símbolo \otimes expressa uma convolução.

O melhor ajuste definido é aquele que minimiza o χ^2 entre o espectro observado (O_λ) e o modelo (M_λ):

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [(O_\lambda - M_\lambda)\omega_\lambda]^2$$

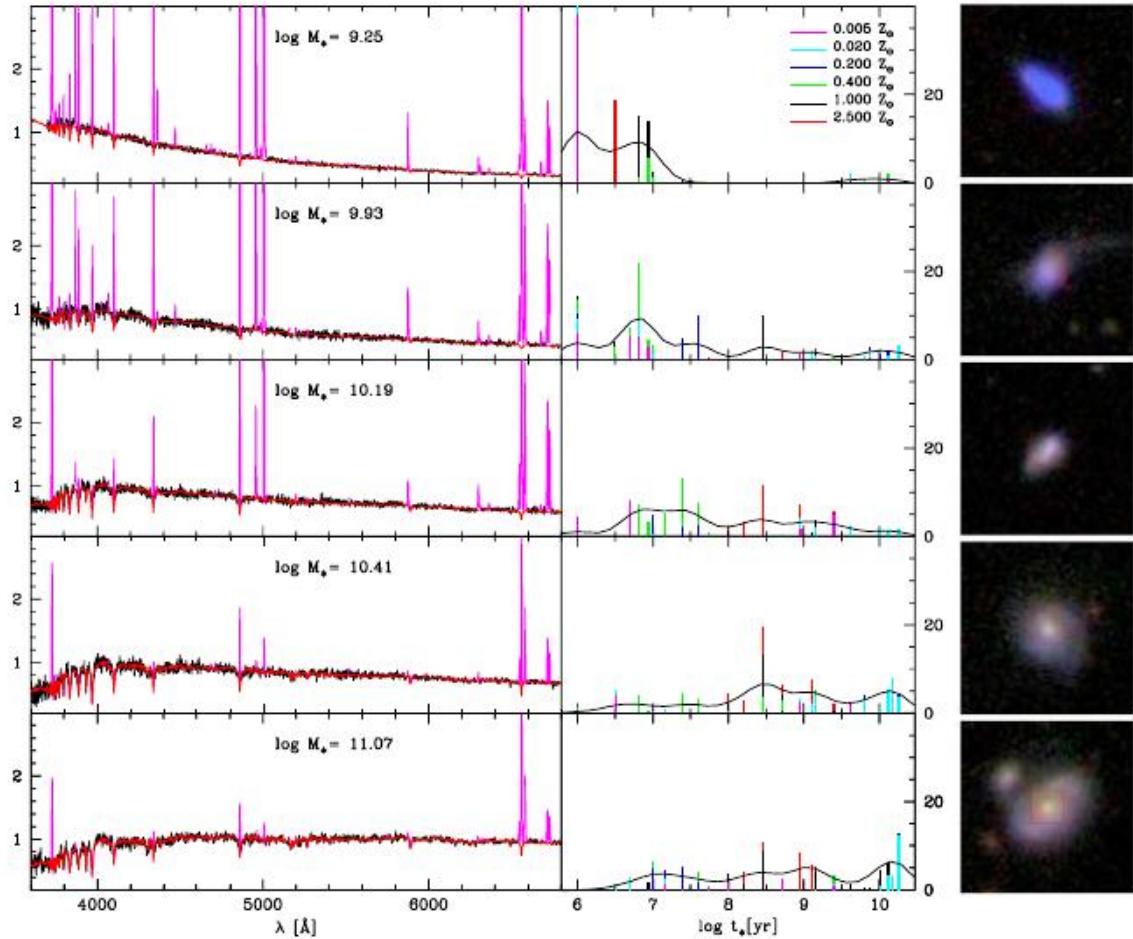
onde ω_λ é o inverso do ruído em O_λ . O algoritmo de Metropolis em conjunto com o “Simulated Annealing” [MacKay 2003] é empregado para evitar que o ajuste prenda-se por mínimos locais. Características espectrais não desejáveis no ajuste, ou por serem muito ruidosas ou por não estarem contempladas na base, podem ser mascaradas com a definição $\omega_\lambda=0$. Usaremos as trajetórias evolutivas de Padova 1994, recomendado por [Bruzual e Charlot 2003], com a função de massa inicial de Chabrier [Chabrier 2003], entre 0,1 e 100 Msolar.

Os arquivos necessário para o código encontram-se disponíveis para download no site www.starlight.ufsc.br, com a devida versão para cada sistema operacional. De forma resumida, os arquivos de entrada necessários para utilizar este código são:

1. Espectro Observado - trata-se do espectro científico, calibrado em fluxo e em comprimento de onda de repouso. É importante ressaltar que o espectro esteja bem calibrado em fluxo, pois é a partir dessa precisão que o melhor ajuste de SSPs será obtido;
2. Máscara Espectral - trata-se de um arquivo para ignorar determinadas regiões do espectro, como por exemplo, raios cósmicos, linhas telúricas, de emissão e extrações ruins que causam regiões com descontinuidade em fluxo;
3. Base Estelar - trata-se dos espectros estelares de SSPs a serem utilizados para ajustar o espectro sintético ao observado.
4. Configuração - trata-se do arquivo que reúne as informações de partida (input) que serão carregadas pelo código, incluindo, por exemplo, a normalização de contínuo, os limites para os parâmetros de cinemática e avermelhamento;
5. Grade - trata-se dos parâmetros das configurações definidas pelo usuário, e contém os espectros a serem ajustados, as base de SSPs, as máscaras, o intervalo em comprimento de onda que será adotado no ajuste, os limites de cinemática e lei de avermelhamento a ser usada: Cardelli, Calzetti ou Gordon.
6. Espectros de SSPs - trata-se dos espectros das populações estelares simples que serão utilizados pelo código STARLIGFHT.

A Figura 6.1 ilustra alguns exemplos de espectros modelados com o código STARLIGFHT, retirado do ‘User Guide’ disponível em <http://www.starlight.ufsc.br/downloads/>.

Figura 6.1: Saída do Código Starlight



Fonte: Spectral fitting with STARLIGHT - Roberto Cid Fernandes. Disponível em <http://www.starlight.ufsc.br/downloads/>

Alguns exemplos de espectros ajustados. Lado esquerdo mostra o espectro observado (em preto) e o ajustado (em vermelho). Linhas verdes marcam as regiões não consideradas no ajuste pois apresentam linhas de emissão. O painel do meio ilustra a fração da luz associada para cada uma das SSPs usadas no ajuste por "bins" na escala de idade. O painel direito mostra imagens das galáxias analisadas extraídas da amostra presente no SDSS.

Capítulo 7

Resultados

Os estudos fotométricos e espectroscópicos para uma grande maioria dos objetos que compõem as Categorias do Catálogo Arp & Madore no Universo local ($z < 0.1$), são ainda insuficientes para tirarmos conclusões ao nível de detalhamento existente nas classes morfológicas do tipo Hubble. As peculiaridades observadas e que compõem as Categorias são diversas e carecem de dados que possam fomentar uma melhor discussão. Portanto, as conclusões obtidas nesse trabalho (ainda que parciais) e a organização das informações em um sistema Web, procuram contribuir para este propósito, sendo apresentadas nos campos da fotometria e da espectroscopia.

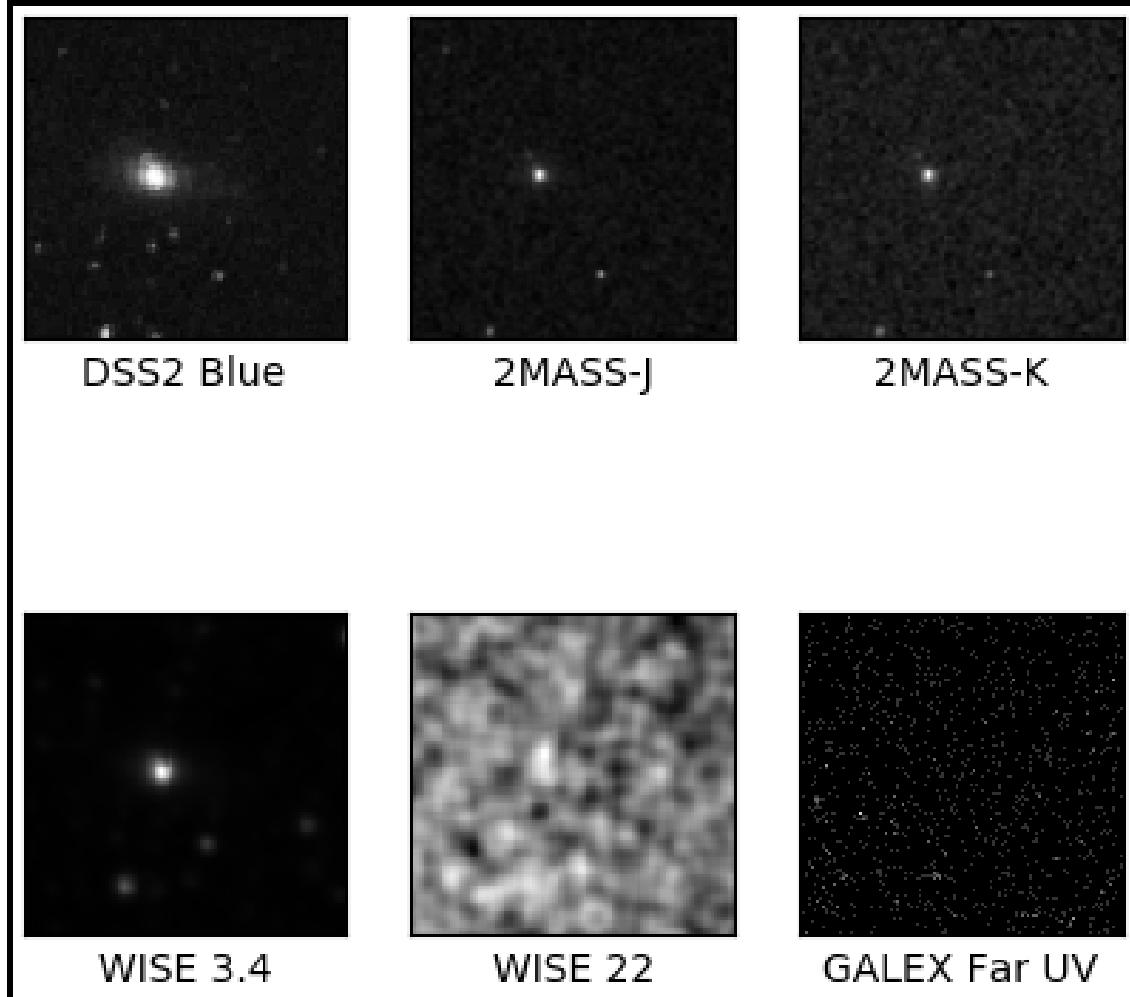
7.1 Fotometria

As imagens recolhidas em diversas bandas espectrais permitiu descrever um primeiro cenário fotométrico para os objetos da Categoria 7. As imagens do SDSS dispõem de informação da banda B, que possibilita uma análise dos componentes de maior energia, e da banda R, componentes mais avermelhados, portanto de natureza mais fria (as imagens desta última banda não estão presentes no mosaico construído). Já as imagens do 2MASS e Wise, fornecem informações de estrelas velhas e poeira, a depender da banda. Com o Galex evidenciamos estruturas de altas energias, como estrelas do tipo O e B ou galáxia com núcleo ativo.

As bibliotecas “astroquery” do python foram usadas para o download das imagens em formato FITS, que é a extensão amplamente usada na Astronomia. A manipulação dessas imagens foi feita com o pacote ”astropy.io”. Analisamos imagens nas bandas J e K do 2MASS, B e R do DSS2, NUV no GALEX e 22 microm do WISE, como podem ser vistas no Apêndice A. Estas identificações preliminares foram importantes pois revelaram como um primeiro resultado que muitas galáxias, apesar da presença do jato, não apresentam evidências claras de estruturas energéticas produzidas pelas estrelas jovens O e B, ou de núcleo ativos associados a buracos negros centrais. As Figuras 7.1 e 7.2 ilustram esses resultados. Como podemos explicar fisicamente essas

características? As imagens representam as seguintes bandas, da esquerda para a direita. Superior: DSS2 Blue, 2MASS-J e 2MASS-K. Inferior: WISE 3.4, Wise 2.2 e GALEX FAR UV.

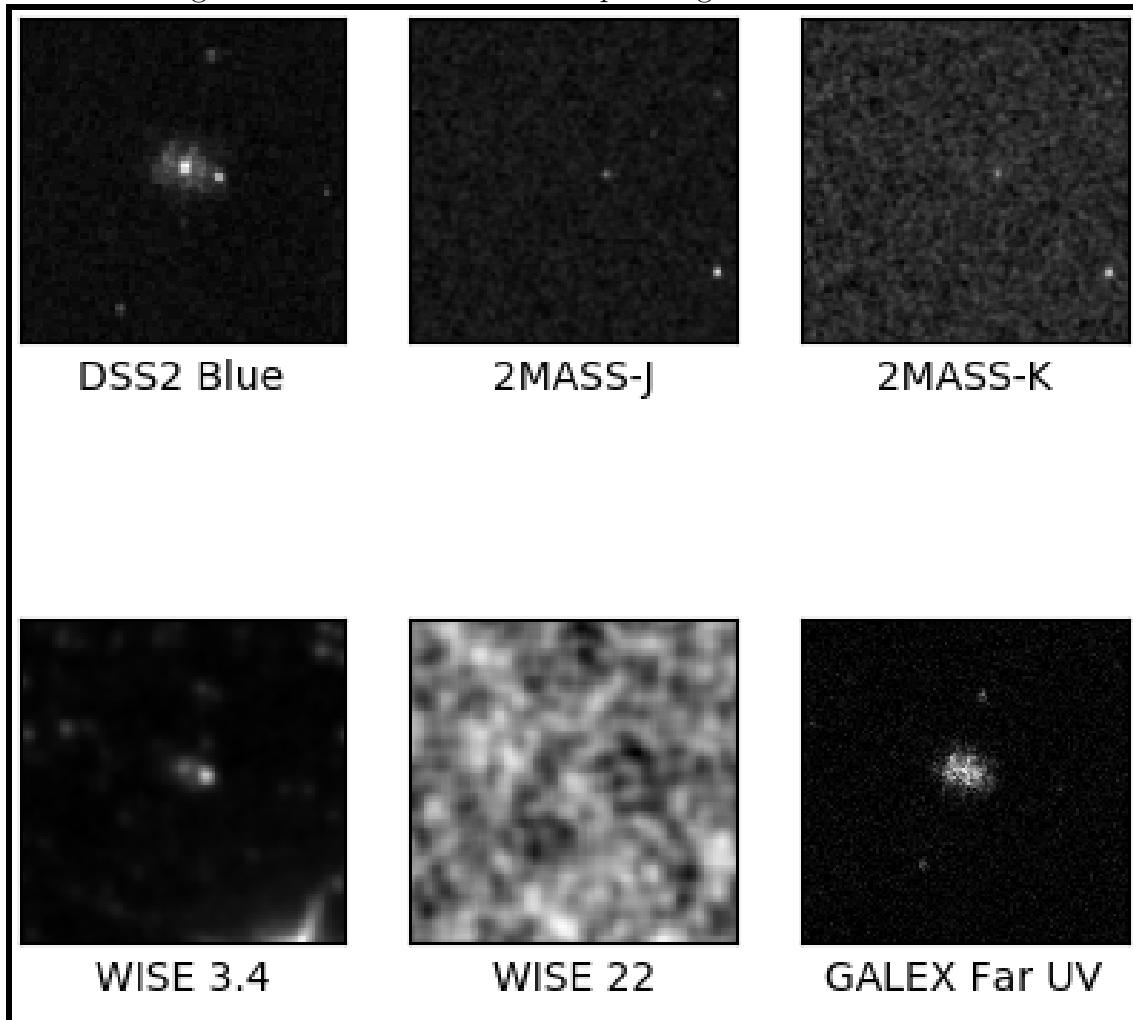
Figura 7.1: Análise fotométrica para a galáxia AM 0233-453



Fonte: Próprio Autor (2018)

Bandas espectrais para a galáxia AM 0233-453. Note que a informação de alta energia esperada no GALEX é praticamente nula, caracterizando este objeto como uma galáxia sem atividade nuclear.

Figura 7.2: Análise fotométrica para a galáxia AM 0256-364



Fonte: Próprio Autor (2018)

Bandas espectrais para a galáxia AM 0256-364. Note, neste caso, que a informação de alta energia esperada no GALEX é bastante significativa, revelando que este objeto possui atividade nuclear e extranuclear.

7.1.1 Atividade Nuclear e Jatos em Galáxias

De uma maneira geral, podemos afirmar que praticamente todas as galáxias apresentam uma vasta coleção de estrelas na região central (incluindo também o bojo), tornando-a, dessa maneira, muito brilhante. No espectro eletromagnético, boa parte dessa radiação é emitida na banda do visível, sendo uma resposta das estrelas presentes nessas regiões. Acontece, porém, que algumas galáxias apresentam o núcleo muito mais brilhante do que o esperado, não apenas no óptico, como no caso das chamadas galáxias normais, mas praticamente em todas bandas espectrais, dos raios gama às emissões em radio. No entanto, essa evidência observational não pode ser

explicada simplesmente pela alta concentração de estrelas na região central desses objetos. Logo, se a origem não é estelar (térmica, via lei de Planck), qual seria o mecanismo físico dessa radiação?

Tais galáxias, cujos centros emitem gigantescas quantidades de radiação e que, curiosamente, apresentam variabilidades (flutuações rápidas em intensidade), não apresentam espectros térmicos (na verdade, seguem uma lei de potência) e são denominados de galáxias ativas, e as regiões centrais de "Núcleos Ativos de Galáxias" (AGN: Active Galactic Nuclei). Estatisticamente, cerca de 10% das galáxias conhecidas são ativas, e são classificadas, com uma descrição muito breve, em LINERS (sendo objetos cujo mecanismo de excitação das linhas não está completamente clara, incluindo fotoionização por uma lei de potência de contínuo diluída, choques, fluxos de resfriamento e também por fotoionização por estrelas muito quentes (Wolf-Rayet) ou normais, do tipo O), Seyferts (galáxias espirais, onde o espectro nuclear apresenta linhas de emissão alargadas, indicando rápidos movimentos dos gases internos, além de um contínuo não térmico muito intenso no ultravioleta), Radiogaláxias (com emissões radio muito intensas, apresentando jatos de matéria que saem da fonte central situada no núcleo da galáxia), Quasares (de aparência estelar no óptico, possuem espectros com linhas alargadas e grandes redshifts, indicando que se encontram muito distantes) e objetos BL Lacertae (sendo também fontes de radio, com espectro não térmico contendo linhas de emissão e/ou absorção). Um recente review (incluindo também as referências) pode ser encontrada em [Padovani et al. 2017].

Uma grande fração de todas as galáxias espirais exibem um espectro nuclear com emissões de linhas se assemelham a regiões HII fotoionizadas. Estes objetos são chamados de núcleos de regiões HII, ou, para os casos excepcionalmente luminosos, núcleos Starburst. Algumas galáxias também contêm discretas regiões HII circunstelar, referidos geralmente como "hotspots". Contudo, apesar de possuírem regiões de emissão nuclear, não são caracterizados como um AGN.

No que tange a fonte de energia interna desses objetos, a comunidade astronômica aceita a ideia de que a origem da atividade nuclear está associada a presença de um buraco negro supermassivo central, de milhões de massa solar, onde o gás acelerado cai no buraco negro e forma um disco de acreção em rotação. Amparado nas leis da Física, a medida que o gás espirala para o centro, ele transforma a energia gravitacional em energia cinética, acelerando, aquecendo e liberando enormes quantidades de energia. Não obstante, parte do gás que foi acretado pode ser ejetado em altas velocidades em direções perpendiculares ao disco de acreção, formando os famosos jatos e os lóbulos observados em muitas galáxias ativas. Uma possível explicação para a colimação dos jatos está associada a presença de fortes campos magnéticos originados no disco. Contudo, é importante salientar que toda energia é irradiada antes da matéria cair no horizonte de eventos do buraco negro, uma fronteira teórica ao redor deste a partir da qual a força gravitacional é tão forte que, nada, nem mesmo a luz, pode escapar pois a velocidade é inferior à velocidade de escape do buraco negro.

A acreção de matéria representa um processo extremamente eficiente em converter matéria em energia: cálculos refinados mostram que nesse processo, a energia liberada é da ordem de $0,1mc^2$, quando comparada com a taxa de reação nuclear mais energética conhecida, a transformação de quatro núcleos de hidrogênio em um núcleo de hélio, que é da ordem de $0,007mc^2$. Portanto, quando o buraco negro consumir toda matéria circundante, a atividade nuclear automaticamente cessa, restando apenas um buraco negro quiescente em seu centro. Este é o mesmo processo básico, proposto Salpeter e Zel'dovich: (1964).

Apesar dessa descrição responder muito bem a presença dos jatos em galáxias com núcleos ativos, como ainda explicar a presença do jato ópticos em galáxias normais, como muito daquelas encontradas na Categoria 7?

Diversos modelos teóricos foram propostos nas últimas décadas para explicar a presença dos jatos, com evidências para a rotação rápida dos buracos negros supermassivos. Um consenso geral esta sendo formado de que os jatos são fundamentalmente fenômenos cuja origem está relacionada aos processos eletromagnéticos no disco de acreção ao redor do buraco negro central, e não apenas como uma consequência de processos puramente hidrodinâmicos.

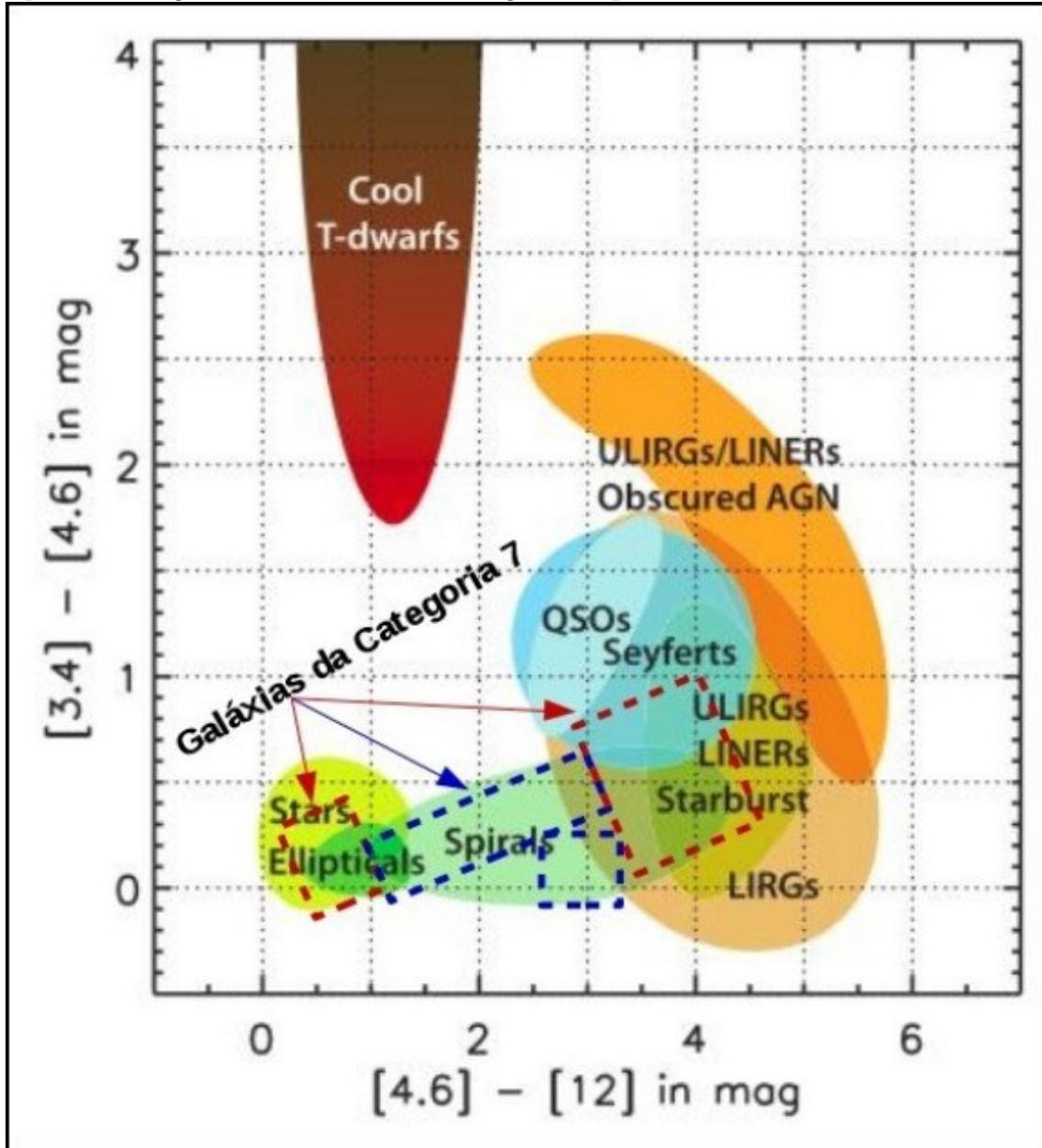
Como não pretendemos construir um novo modelo que possa envolver tais quantidades físicas, esperamos contribuir com informações fotométricas e espectroscópicas que possam fomentar novas discussões sobre as peculiaridades observadas nos objetos da Categoria 7.

7.1.2 Diagrama de Cores

Um mapa do tipo cor-cor é importante pois permite obter algumas informações independentes da distância do objeto estudado. O que estamos denominando de cor neste trabalho, consiste na diferença entre o brilho do objeto em bandas diferentes do espectro eletromagnético. Assim, podemos analisar as propriedades dos objetos selecionados e averiguar se existe alguma segregação nestes.

Ao separar em dois conjuntos a nossa amostra fotométrica (objetos com atividade nuclear e sem atividade nuclear), não apenas com a ajuda das imagens, mas também com a espectroscopia, geramos, automaticamente, uma segregação. Embora a morfologia peculiar não esteja presente no diagrama presente na Figura 7.3 (o que pode ser pensado como algo similar para todas as Categorias do Catálogo Arp & Madore), é possível, pelo menos, verificar que esta segregação desaparece e percebemos que os objetos permeiam entre os diversos níveis de energia nuclear, revelando que os mesmos, apesar de sua característica peculiar, comunga de propriedades semelhantes as diversas outras classes morfológicas de Hubble. É importante frisar que não estamos comparando classes morfológicas, mas sim uma ideia referente as atividades (ou não) presentes no núcleo. Percebe-se também que o autor do diagrama [Wright et al. 2010], não fez qualquer separação entre subclassificações existentes nas elípticas ou nas espirais.

Figura 7.3: Diagrama cor-cor, mostrando a localização da classificação de diferentes tipos morfológicos. Nesta, incluímos as galáxias peculiares desse estudo.



Fonte: [Wright et al. 2010] (modificado).

A cor W1-W2 ($[3.4]-[4.6]$ in mag), fornece informação sobre o conteúdo mais azulado, enquanto a cor W2-W3 ($[4.6]-[12]$ in mag) fornece indícios de conteúdos mais avermelhado. Portanto, podemos inferir sobre a população estelar das galáxias estudadas, representadas pelas regiões tracejadas sobre a Figura.

O diagrama cor-cor na banda do WISE (Figura 7.3), fornece uma separação clara entre os principais tipos morfológicos/espectrais conhecidos. Apesar de tratar ti-

pos morfológicos, também fornecem informações sobre o tipo de atividade nuclear (se presente ou não) nestas classes. Portanto, o lado esquerdo do gráfico exprimi atributos de galáxias velhas, sem atividade nuclear e extranuclear. Já no extremo oposto, temos o perfil de galáxias com forte atividade nuclear ou extranuclear. Fica claro que os objetos estudados não apenas permeiam por estes dois grupos, mas também possuem características semelhantes (em cores) com vários tipos morfológicos. O próximo passo consiste em conhecer o conteúdo das populações estelares presentes nesses objetos através do código de síntese espectral STARLIGHT.

7.2 Síntese Espectral

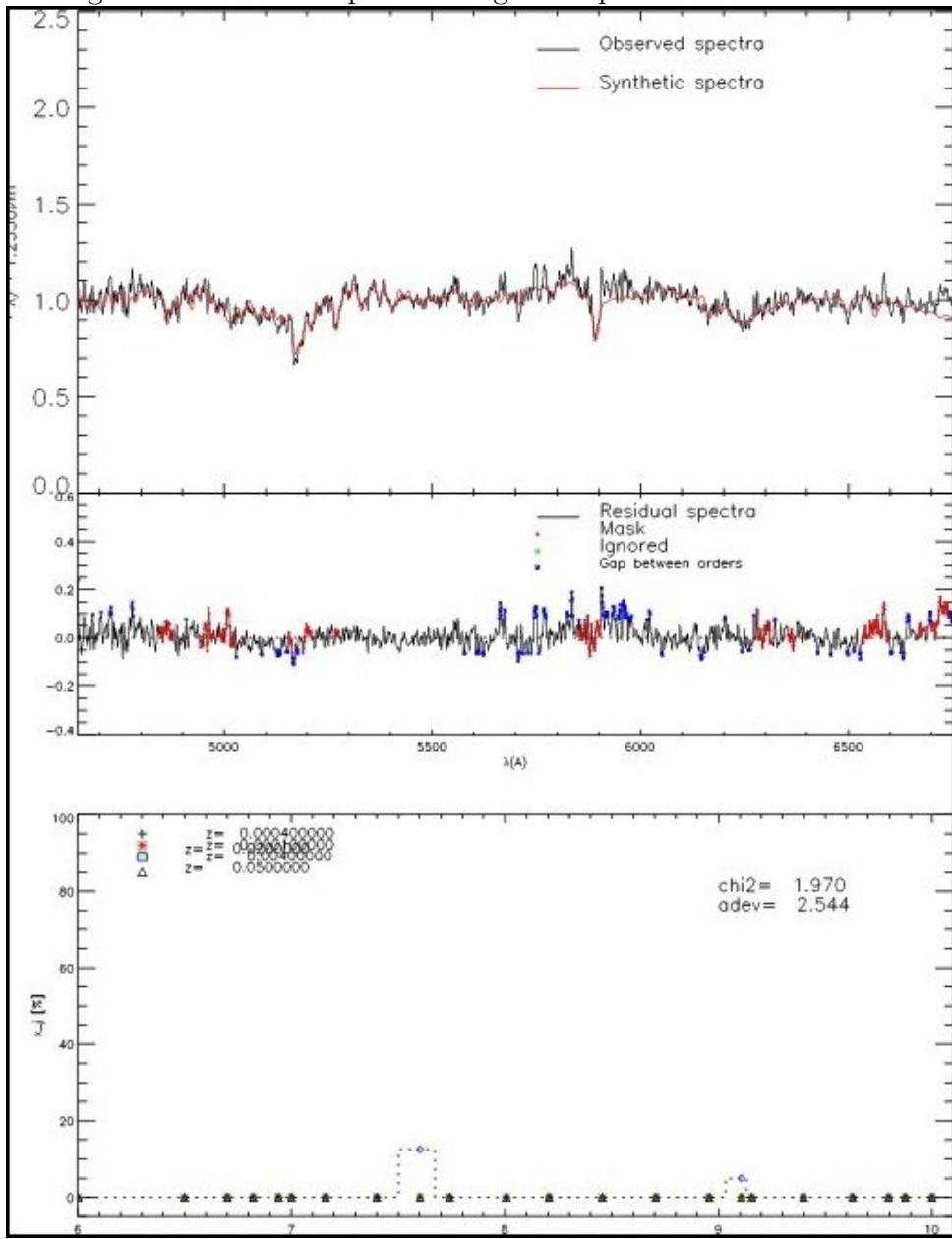
O código STARLIGHT cria e ajusta ao espectro observado e devidamente calibrado, um espectro sintético que representa uma combinação linear de SSPs extraídas de uma grade de modelos semi-empíricos. O resultado esperado da síntese espectral fornece um vetor de população (\vec{x}), que representa a fração de contribuição das SSPs utilizadas no ajuste de diferentes idades (muito jovens, jovens, intermediárias e velhas), e o próprio espectro sintético (M_λ). Outros resultados estão relacionados com a velocidade de dispersão da galáxia e o vetor de massa ($\vec{\mu}$), que representa a fração de massa de cada SSP tomada no ajuste.

Para calcularmos os espectros sintéticos de nossa amostra (observada e da literatura), o código ajusta a melhor combinação de SSPs para fazer o melhor ajuste possível ao espectro de entrada, fornecendo várias propriedades físicas de interesse, como a massa estelar atual, a extinção estelar, as distribuições e médias das idades (t) e metalicidades (Z) das SSPs, i.e., as frações de massa e de luminosidade para cada SSP de certa idade e metalicidade. Desse modo, podemos construir uma possível história de formação estelar do sistema físico estudado, bem como inferir sobre a evolução temporal do enriquecimento químico traçado pelas populações estelares do sistema (relação entre Z e t).

Como os objetos da literatura são estudos baseados em grandes surveys, já reduzidos e calibrados, selecionamos um conjunto de observações realizadas no OPD-LNA/MCTIC para servir de controle, no que tange a redução e a síntese espectral. O desejável seria que todo o conjunto de objetos do OPD/LNA-MCTIC estivesse presente na amostra do 6dFGS, o que não foi possível. Apenas cinco objetos possuem espectros no referido survey. Contudo, as informações são igualmente importantes para compilar uma primeira base de dados espectroscópicos para essa Categoría.

As Figuras 7.4 e 7.5 ilustram dois exemplos das sínteses espetrais conduzidas para dois objetos em comum da amostragem, AM 2359-381 (galáxia normal) e AM 0633-352 (galáxia ativa). Os detalhes das sínteses são dadas nas próprias Figuras.

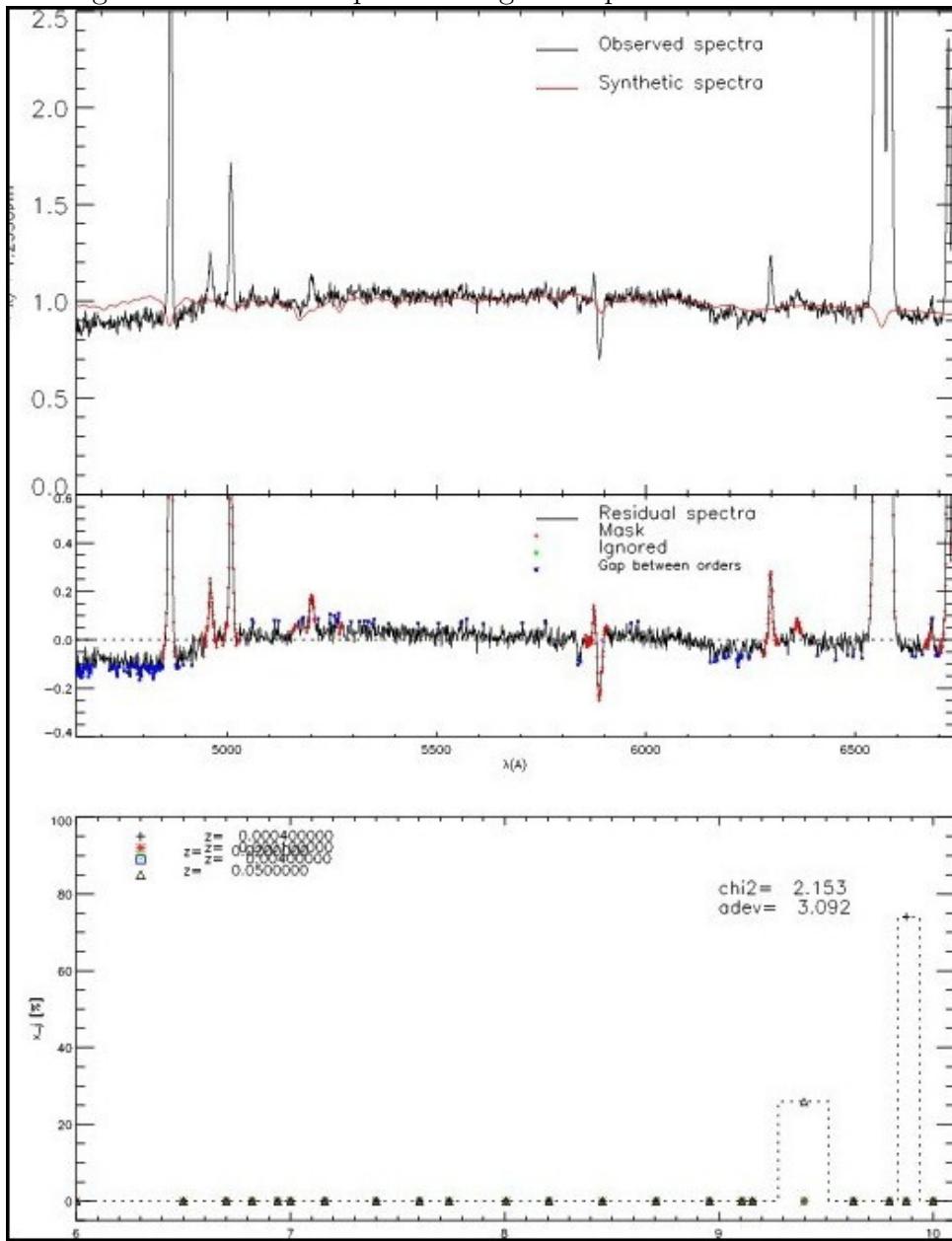
Figura 7.4: Síntese espectral da galáxia peculiar AM 2359-381.



Fonte: Próprio Autor. painel Superior.

Painel Superior: A linha preta sólida representa o espectro observado e, em vermelho, o modelado (sintético). Painel Central: As linhas vermelhas representam as máscaras usadas em regiões de linhas de emissão, extrações ruins oriundas das reduções, linhas telúricas, etc.; as linhas verdes significam regiões que foram ignoradas durante a síntese, previamente definidas pelo usuário, e as azuis, os possíveis "gap" entre as ordens durante o processo de ajuste espectral. Painel Inferior: As diferentes metalicidades encontradas em função do vetor de população (eixo y) e do logaritmo da idade (em anos).

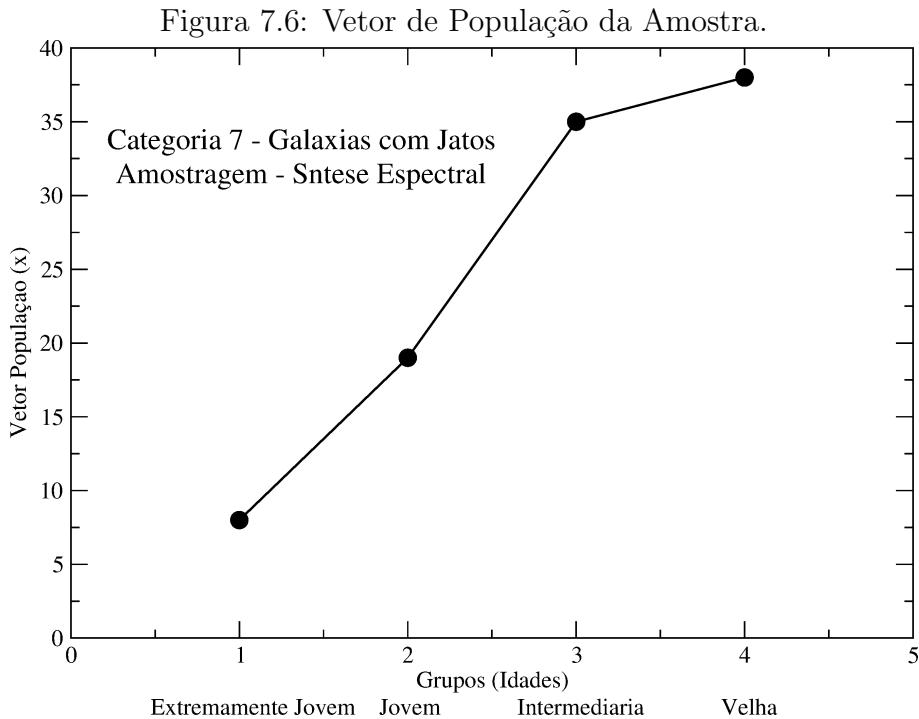
Figura 7.5: Síntese espectral da galáxia peculiar AM 0633-352



Fonte: Próprio autor. Ver comentários na Figura 7.4

A Figura 7.6 ilustra a distribuição das idades (por Grupo) a partir da síntese espectral, o que permite inferir diretamente sobre a população estelar com maior predominância na Categoria 7. Podemos perceber que uma fração considerável dos objetos já consumiram as reservas de gás, apresentando assim, estrelas velhas e material interestelar frio, tal como as galáxias elípticas. Ressaltamos que uma parcela dos objetos estão superpostos nesta região na Figura 7.3. Por outro lado, um outro grupo de galáxias apresentam elementos que favorecem à formação de estrelas,

similares a que observamos nos braços de galáxias espirais e nas morfologias mais a direita no diagrama.



Fonte: Autor (própria). Predominância das populações na amostra selecionada da Categoria 7. Os Grupos de Idade seguem os seguintes intervalos: G1 - Extremamente Jovens, x_{Mj} ($t \leq 1 \times 10^8$ anos); G2 - Jovens, x_J ($1 \times 10^8 < t \leq 5 \times 10^8$ anos); G3 - Idades Intermediárias, x_I , ($5 \times 10^8 < t \leq 2 \times 10^9$ anos) e G4 - Velhas, x_O ($t > 2 \times 10^9$ anos).

7.3 Algumas Questões sobre os Jatos nas Galáxias Estudadas.

Que tipo de jato, envolvendo uma categoria particular de galáxias classificadas como peculiares, estamos discutindo neste trabalho? Será que as peculiaridades observadas no óptico são diferentes, no que tange aos mecanismos de produção, dos jatos relativísticos extragaláticos observados em radiogaláxias?

Um jato astrofísico pode ser definido, de forma simplificada, como um escoamento de material proveniente da região central de uma galáxia. Sendo estes escoamentos colimados de plasma ejetados a velocidades relativísticas, emergindo dos núcleos ativos de galáxias em direções opostas, transportando enormes quantidades de massa, momentum e energia, temos, claramente os chamados jatos relativísticos com evidência

teóricas e observacionais associadas a rotação rápida dos buracos negros supermassivos. Os processos físicos envolvidos nesses casos não são triviais e tem desafiado ao longo do tempo a nossa compreensão quanto a origem, colimação, propagação, radiação etc., além de outros processos físicos envolvidos [Begelman et al. 1984, Ferrari 1998, Blandford 1990, Krolik 1999, Meier et al. 2001, Collin 2006] dentre outros.

A combinação envolvendo estudos teóricos [Blandford e Znajek 1977, Blandford e Payne 1982, Begelman et al. 1984, Punsly e Coroniti 1990, Ferrari 1998, Meier et al. 2001] associado ao uso de complexas simulações numéricas magnetohidrodinâmicas (MHD) relativísticas [Koide et al. 2000, Koide 2003, McKinney e Gammie 2004, De Villiers et al. 2005, Komissarov 2005, Hawley e Krolik 2006, McKinney 2006, McKinney e Narayan 2007, Punsly 2007, Tchekhovskoy et al. 2008] estão fornecendo importantes pistas para a compreensão física das energias transportadas pelos jatos extragaláticos. No entanto, esta é uma tarefa árdua e toda contribuição nos campos da fotometria, espectroscopia e polarimetria são de suma importância nesse processo.

Os seguintes pontos traduzem algumas questões primárias sobre a presença dos jatos observados nessas galáxias peculiares.

1. No caso particular das galáxias peculiares, a origem comumente associada para as morfologias esperadas encontra-se ancorada em um dos processos de interação gravitacional: colisão, fusão ou efeito de maré. Portanto, é esperado que algum desses processos perturbativos possa disparar algum mecanismo interno que culmine no jato observado. Infelizmente, nem as imagens e nem os espectros dos bancos de dados, contêm informações sobre os jatos observados. Que tipo de correlação com o espectro nuclear observado, após a síntese de população estelar, poderíamos esperar?
2. Qual a origem dos jatos em galáxias peculiares normais, reveladas pelas imagens ou pela síntese espectral?
3. A existência de contrapartidas em rádio desses objetos poderiam levá-los a uma discussão similar já estabelecida para as radiogaláxias?
4. Os jatos relativísticos já estudados na literatura podem permanecer altamente colimados até distâncias da ordem de centenas de kiloparsecs em relação ao centro das radiogaláxias? No caso das galáxias peculiares com jatos, as distâncias são de apenas alguns kiloparsecs. Qual a justificativa que podemos apontar para esta diferença? Será que o escoamento acretivo que deposita massa no buraco negro central, atravessado por linhas de campo magnético de grande escala, é relativamente menor?
5. Os jatos podem exercer algum impacto no meio interestelar das galáxias hospedeiras?

Capítulo 8

Considerações Finais

O presente estudo objetiva contribuir para o conhecimento das galáxias peculiares que apresentam jatos no óptico. Como são objeto pouco estudados, tanto na fotometria, quanto na espectroscopia, realizamos um levantamento em bancos de dados para fomentar essa discussão. As bandas obtidas revelaram importantes informações sobre as regiões nuclear e extranuclear desses objetos, permitindo correlacionar diretamente, no caso da banda GALEX (ultravioleta próximo), com uma atividade nuclear. Esse aspecto é muito importante, pois permite que tenhamos uma estimativa sobre quantitativo de galáxias ativas da Categoria 7 presentes no Universo local. Neste estudo preliminar, 41,6% podem ser rotuladas como galáxias normais, sendo a grande maioria da população estelar velha. Por outro lado, a amostragem também revelou que 58,4% possuem algum tipo de atividade nuclear, que permeia desde Starburst (ou regiões HII) até AGN, com populações com representações de estrelas muito jovens, jovens e de idades intermediárias.

Para os espectros, conseguimos reunir uma razoável amostragem no survey conduzido pelo 6dFGS, mas apenas com informações da região nuclear. Isso já era esperado, pois, na grande maioria dos surveys, os levantamentos realizados do céu não são projetos dedicados para explorar um ou outro objeto. Além do mais, o tempo considerado para cada fonte não é suficiente para obter alguma informação espectral do jato.

As observações conduzidas no OPD/LNA-MCTI, dedicadas para o estudo espectroscópicos desses objetos, permitiu de certa forma controlar a síntese espectral nos dados do 6dFGS. Infelizmente, apenas cinco objetos estavam presentes em ambas amostragens. Contudo, os resultados foram satisfatórios, pois as mesmas informações relacionadas como a populações estelares foram obtidas. Isso representa um ponto crítico, pois os dados espectrais do 6dFGS já estavam reduzidos e calibrados.

Embora tenhamos apresentados alguns resultados preliminares para esta particular categoria de objetos peculiares, uma interpretação sobre a origem, colimação, propagação e radiação, ainda encontra-se aberta. Na verdade, trata-se de um problema

onde modelos teóricos analíticos e computacionais ainda buscam uma interpretação mais consistente.

Dentro do campo da Astrofísica, os buracos negros supermassivos que habitam o centro da maior parte das galáxias na época presente, representam o mecanismo chave para explicar tais fenômenos físicos. No caso particular dos objetos estudados no óptico, podemos inferir que estes também estão presentes, mas acretam gás a baixas taxas de acreção, revelando características relativamente diferentes, sobre tudo, em relação as distâncias cobertas de centenas de kiloparsecs a partir da fonte emissora.

Outro aspecto importante sobre os buracos negros, reside no fato que estes dão origem à população dominante de AGN nas galáxias próximas. No caso particular dos nossos objetos, os AGN revelados são de baixa luminosidade (LLAGNs), compatíveis com aqueles observados no Universo local.

Esperamos ainda explorar os dados obtidos até aqui de outras maneiras, correlacionado, por exemplo, com alguns parâmetros geométricos como a inclinação, razão axial, excentricidade e elipticidade, na perspectiva de inferir se existe alguma correlação com a direção observada do jato. Outra perspectiva está associada as intensidades das linhas de emissão detectadas após a subtração da população estelar subjacente, com o correspondente tipo morfológico. Um número considerável são galáxias com características espirais. Como a emissão desse tipo de galáxia sofre variabilidade em períodos relativamente curtos, podemos concluir que a fonte emissora deve ser compacta, o que corrobora com o cenário descrito acima, que estas galáxias acretam gás a baixas taxas de acreção, quando comparadas as radiogaláxias.

Finalmente, a contribuição computacional dada através da implantação do sistema Web permitirá que diversos pesquisadores possam alimentar com dados e informações que permitam compreender a natureza peculiar da Categoría 7.

Alguns exemplos de galáxias com linhas de absorção e emissão, além da síntese espectral, são mostradas nos Apêndices A, B e C, respectivamente. Todas os objetos estarão disponíveis para consulta interativa no sistema Web.

Capítulo 9

Redução e Medidas: Pacotes de Programas Utilizados

9.1 IRAF

Para as observações realizadas no OPD-LNA/MCTIC, a redução e as medidas envolvendo os espectros das galáxias peculiares com jatos foi realizada com o pacote de tarefas IRAF (Image Reduction and Analysis Facility), versão 2.16. Detalhes sobre o pacote podem ser obtidos em [Tody 1993]. O IRAF é distribuído pelos National Optical Astronomy Observatories (NOAO), que são operados pela Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. (AURA), sob acordo cooperativo com a National Science Foundation.

9.2 Linguagens de Programação

9.2.1 IDL

O ambiente IDL (Interactive Data Language) é produto da RSI (<http://www.rsinc.com>). Alguns programas foram elaborados para plotar os gráficos resultantes da síntese espectral e também para calcular as intensidades e larguras das linhas de emissão.

9.2.2 Python

O Python é uma linguagem de programação de alto nível, lançada em 1991 por Guido Van Rossum em modelo de desenvolvimento comunitário, portanto, com código aberto e gerenciado pelo Python Software Foundation (<https://www.python.org>).

`org/psf/`). A linguagem possui algumas características importantes para o tipo de estudo que pretendemos: é interpretada, ou seja, é executada por um interpretador de comandos; é orientada a objetos, a qual implementa um conjunto de classes que possuem comportamento e estados; é fortemente tipificada e dinâmica, já que a verificação do tipo de variável é feita em tempo real de execução e a conversão de tipos não é feita pelo interpretador, já que são bem definidas e não sofrem coerção.

Usamos a biblioteca astroquery para fazer o download das imagens, em formato FITS, que é a extensão amplamente usada na astronomia para imagens e tabelas. A manipulação das imagens foi feita com o astropy.io. Também usamos as bibliotecas astroquery.ned e astroquery.vizier para a extração das informações nos bancos de dados.

Também foi feito um programa em python para a conversão dos espectros .FITS em arquivos .DAT, necessários para alimentar o arquivo de entrada do STARLIGHT no FORTRAN.

9.2.3 Demais linguagens de programação

O compilador Fortran foi usado para o código de síntese espectral STARLIGHT, cujos executáveis e outros arquivos necessários podem ser obtidos no link www.starlight.ufsc.br/.

No que tange a uma série de outros programas, usamos o compilador C.

Referências Bibliográficas

- [Alam et al. 2015] Alam, S., Albareti, F. D., Prieto, C. A., Anders, F., Anderson, S. F., Anderton, T., Andrews, B. H., Armengaud, E., Aubourg, É., Bailey, S., et al. (2015). *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 219(1):12.
- [Arp 1966] Arp, H. (1966). Atlas of peculiar galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 14:1.
- [Arp e Madore 1987] Arp, H. C. e Madore, B. (1987). *A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations: Volume 1, Positions and Descriptions*, volume 1. Cambridge University Press.
- [Asari et al. 2007] Asari, N., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Torres-Papaqui, J., Mateus, A., Sodré, L., Schoenell, W., Gomes, J., e collaboration, S. (2007). The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381(1):263–279.
- [Begelman et al. 1984] Begelman, M. C., Blandford, R. D., e Rees, M. J. (1984). Theory of extragalactic radio sources. *Reviews of Modern Physics*, 56(2):255.
- [Bica 1988] Bica, E. (1988). Population synthesis in galactic nuclei using a library of star clusters. , 195:76–92.
- [Blandford e Payne 1982] Blandford, R. e Payne, D. (1982). Hydromagnetic flows from accretion discs and the production of radio jets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 199(4):883–903.
- [Blandford 1990] Blandford, R. D. (1990). Physical processes in active galactic nuclei. In *Active Galactic Nuclei*, pp. 161–275. Springer.
- [Blandford e Znajek 1977] Blandford, R. D. e Znajek, R. L. (1977). Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 179(3):433–456.
- [Brandt 2017] Brandt, W. N. (2017). Astro 1: ‘slides’ for class 21 - examples of galaxies.
- [Bruzual e Charlot 2003] Bruzual, G. e Charlot, S. (2003). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344(4):1000–1028.

- [Burrows 2000] Burrows, A. (2000). Active galaxies, distant galaxies, and the expanding universe.
- [Buta et al. 2015] Buta, R. J., Sheth, K., Athanassoula, E., Bosma, A., Knapen, J. H., Laurikainen, E., Salo, H., Elmegreen, D., Ho, L. C., Zaritsky, D., et al. (2015). A classical morphological analysis of galaxies in the spitzer survey of stellar structure in galaxies (s4g). *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 217(2):32.
- [Cappellari et al. 011a] Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., McDermid, R. M., Scott, N., Verdoes Kleijn, G., Young, L. M., Alatalo, K., Bacon, R., Blitz, L., et al. (2011a). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413(2):813–836.
- [Casasola et al. 2004] Casasola, V., Bettoni, D., e Galletta, G. (2004). The gas content of peculiar galaxies: Strongly interacting systems. *Astronomy & Astrophysics*, 422(3):941–950.
- [Chabrier 2003] Chabrier, G. (2003). *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115(809):763.
- [Cid Fernandes et al. 2004] Cid Fernandes, R., Gu, Q., Melnick, J., Terlevich, E., Terlevich, R., Kunth, D., Rodrigues Lacerda, R., e Joguet, B. (2004). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 355(1):273–296.
- [Collin 2006] Collin, S. (2006). Quasars and galactic nuclei, a half-century agitated story. In *AIP Conference Proceedings*, volume 861, pp. 587–595. AIP.
- [Coulson I. M. 1989] Coulson I. M., Menzies J. W., S. W. L. M. (1989). *AJ*, pp. 97.
- [da Rocha-Poppe et al. 2011] da Rocha-Poppe, P., Faúndez-Abans, M., Fernandes-Martin, V., Fernandes, I., de Oliveira-Abans, M., e Rodrígues-Ardila, A. (2010, 2011). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402(3):1480–1488.
- [De Vaucouleurs 1958] De Vaucouleurs, G. (1958). Tilt criteria and direction of rotation of spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 127:487.
- [de Vaucouleurs G. 1991] de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., C. J. H. G. (1991). Third reference catalogue of bright galaxies, version 3.9. *AJ*.
- [De Villiers et al. 2005] De Villiers, J.-P., Hawley, J. F., Krolik, J. H., e Hirose, S. (2005). Magnetically driven accretion in the kerr metric. iii. unbound outflows. *The Astrophysical Journal*, 620(2):878.
- [Donzelli e Pastoriza 2000] Donzelli, C. J. e Pastoriza, M. G. (2000). Spectroscopic observations of merging galaxies. *The Astronomical Journal*, 120(1):189.
- [Dreyer 1888] Dreyer (1888). Third reference catalogue of bright galaxies, version 3.9. *Mem. R. A. S.*, 49:1–237.
- [Faber et al. 1985] Faber, S. M., Friel, E. D., Burstein, D., e Gaskell, C. M. (1985). Old stellar populations. II - an analysis of K-giant spectra. , 57:711–741.

- [Faúndez-Abans et al. 2015] Faúndez-Abans, M., Reshetnikov, V., de Oliveira-Abans, M., Krabbe, A., da Rocha-Poppe, P., Fernandes-Martin, V., Amôres, E., e Freitas-Lemes, P. (2015). Visiting two objects in the field of the ring galaxy hrg 2302. *Astronomy & Astrophysics*, 574:A70.
- [Fernandes et al. 2007] Fernandes, R. C., Asari, N., Sodré, L., Stasińska, G., Mateus, A., Torres-Papaqui, J., e Schoenell, W. (2007). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 375(1):L16–L20.
- [Fernandes et al. 2005] Fernandes, R. C., Mateus, A., Sodré, L., Stasińska, G., e Gomes, J. M. (2005). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358(2):363–378.
- [Ferrari 1998] Ferrari, A. (1998). Modeling extragalactic jets. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36(1):539–598.
- [Freedman e Kaufmann 2008] Freedman, R. A. e Kaufmann, W. J. (2008). *Universe*. W.H. Freeman, 8th edition.
- [Freitas-Lemes et al. 2017] Freitas-Lemes, P., Krabbe, A., Faúndez-Abans, M., da Rocha-Poppe, P., Rodrigues, I., de Oliveira-Abans, M., e Fernandes-Martin, V. (2017). The peculiar ring galaxy hrg 54103 revisited. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468(3):3159–3165.
- [Hawley e Krolik 2006] Hawley, J. F. e Krolik, J. H. (2006). Magnetically driven jets in the kerr metric. *The Astrophysical Journal*, 641(1):103.
- [Heckman 1981] Heckman, T. (1981). Optical emission-line gas associated with dominant cluster galaxies. *The Astrophysical Journal*, 250:L59–L63.
- [Hills et al. 2013] Hills, M., Klint, P., e Vinju, J. (2013). An empirical study of php feature usage: a static analysis perspective. In *Proceedings of the 2013 international symposium on software testing and analysis*, pp. 325–335. ACM.
- [Hubble 1926] Hubble, E. (1926). *Apj*, 64:321.
- [Jarrett 2004] Jarrett, T. (2004). Large scale structure in the local universe—the 2mass galaxy catalog. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 21(4):396–403.
- [Jarrett et al. 2000] Jarrett, T., Chester, T., Cutri, R., Schneider, S., Skrutskie, M., e Huchra, J. (2000). 2mass extended source catalog: overview and algorithms. *The Astronomical Journal*, 119(5):2498.
- [Jones et al. 2009] Jones, D. H., Read, M. A., Saunders, W., Colless, M., Jarrett, T., Parker, Q. A., Fairall, A. P., Mauch, T., Sadler, E. M., Watson, F. G., et al. (2009). The 6df galaxy survey: final redshift release (dr3) and southern large-scale structures. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(2):683–698.
- [Jones et al. 2004] Jones, D. H., Saunders, W., Colless, M., Read, M. A., Parker, Q. A., Watson, F. G., Campbell, L. A., Burkey, D., Mauch, T., Moore, L., et al.

- (2004). The 6df galaxy survey: samples, observational techniques and the first data release. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 355(3).
- [Karachentsev e Kaisina 2013] Karachentsev, I. D. e Kaisina, E. I. (2013). Star formation properties in the local volume galaxies via $\text{H}\alpha$ and far-ultraviolet fluxes. *The Astronomical Journal*, 146(3):46.
- [Keel 1985] Keel, W. (1985). Recognition and classification of galaxies with optical jets. *The Astronomical Journal*, 90:2207–2217.
- [Kennicutt 1998] Kennicutt, R. (1998). Star formation in galaxies along the hubble sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36(1):189–231.
- [Kennicutt et al. 2008] Kennicutt, Jr., R. C., Lee, J. C., Funes, J. G., J., S., Sakai, S., e Akiyama, S. (2008). An $\text{H}\alpha$ Imaging Survey of Galaxies in the Local 11 Mpc Volume. , 178:247–279.
- [Knapp et al. 2014] Knapp, M. L., Vangeli, A. L., e Caughlin, J. P. (2014). *Interpersonal communication & human relationships*. Pearson Higher Ed.
- [Koide 2003] Koide, S. (2003). Magnetic extraction of black hole rotational energy: Method and results of general relativistic magnetohydrodynamic simulations in kerr space-time. *Physical Review D*, 67(10):104010.
- [Koide et al. 2000] Koide, S., Meier, D. L., Shibata, K., e Kudoh, T. (2000). General relativistic simulations of early jet formation in a rapidly rotating black hole magnetosphere. *The Astrophysical Journal*, 536(2):668.
- [Komissarov 2005] Komissarov, S. (2005). Observations of the blandford–znajek process and the magnetohydrodynamic penrose process in computer simulations of black hole magnetospheres. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 359(3):801–808.
- [Krabbe et al. 2017] Krabbe, A. C., Rosa, D. A., Pastoriza, M. G., Hägele, G., Cardaci, M. V., Dors Jr, O., e Winge, C. (2017). Interaction effects on galaxy pairs with gemini/gmos-iii: stellar population synthesis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(1):27–49.
- [Krolik 1999] Krolik, J. H. (1999). *Active galactic nuclei: from the central black hole to the galactic environment*. Princeton University Press.
- [Lorre 1978] Lorre, J. (1978). Enhancement of the jets in ngc 1097. *The Astrophysical Journal*, 222:L99–L103.
- [Ma et al. 2014] Ma, C.-P., Greene, J. E., McConnell, N., Janish, R., Blakeslee, J. P., Thomas, J., e Murphy, J. D. (2014). The massive survey. i. a volume-limited integral-field spectroscopic study of the most massive early-type galaxies within 108 mpc. *The Astrophysical Journal*, 795(2):158.
- [Maciel 1999] Maciel, A. (1999). Amm maciel et al., phys. rev. c 59, 2103 (1999). *Phys. Rev. C*, 59:2103.

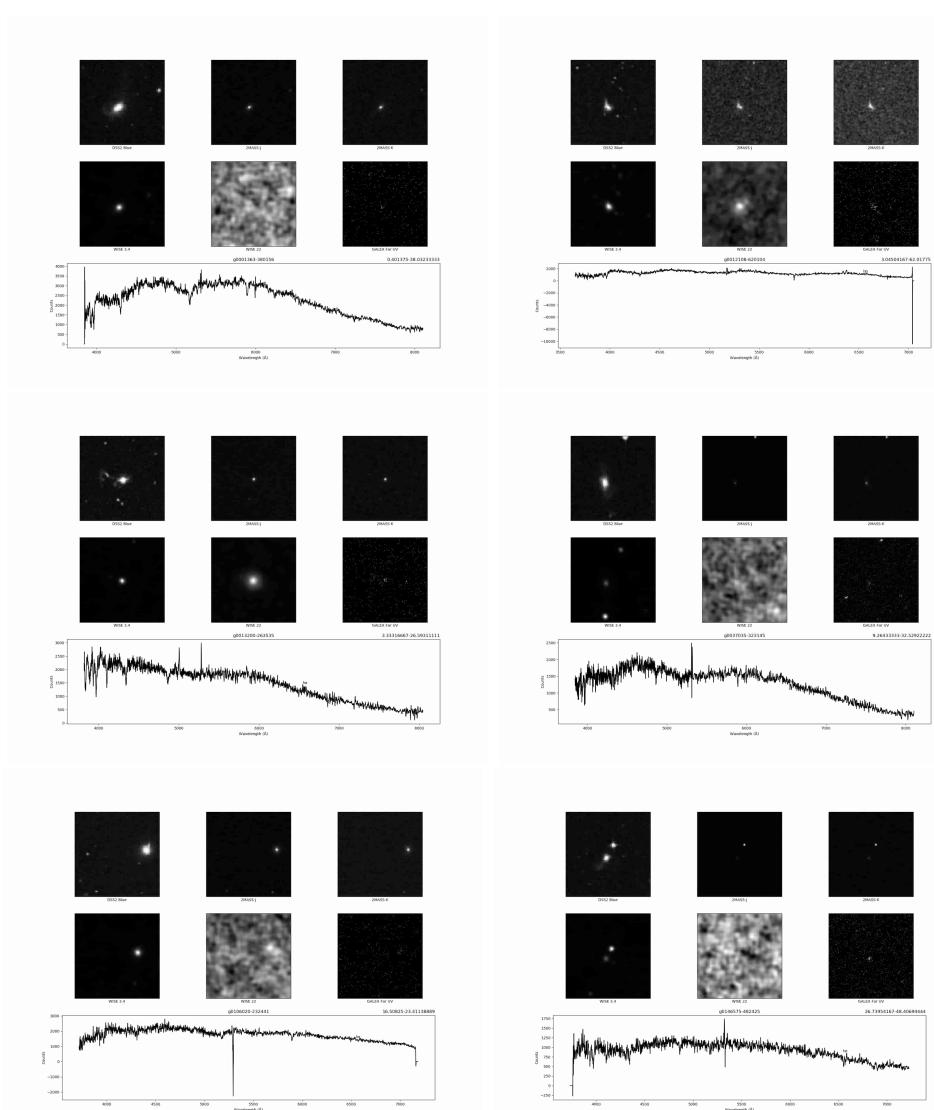
- [MacKay 2003] MacKay, D. J. (2003). *Information theory, inference and learning algorithms*. Cambridge university press.
- [McKinney 2006] McKinney, J. C. (2006). General relativistic magnetohydrodynamic simulations of the jet formation and large-scale propagation from black hole accretion systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 368(4):1561–1582.
- [McKinney e Gammie 2004] McKinney, J. C. e Gammie, C. F. (2004). A measurement of the electromagnetic luminosity of a kerr black hole. *The Astrophysical Journal*, 611(2):977.
- [McKinney e Narayan 2007] McKinney, J. C. e Narayan, R. (2007). Disc–jet coupling in black hole accretion systems–i. general relativistic magnetohydrodynamical models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 375(2):513–530.
- [Meier et al. 2001] Meier, D. L., Koide, S., e Uchida, Y. (2001). Magnetohydrodynamic production of relativistic jets. *Science*, 291(5501):84–92.
- [Micheva et al. 2013] Micheva, G., Östlin, G., Bergvall, N., Zackrisson, E., Masegosa, J., Marquez, I., Marquart, T., e Durret, F. (2013). Deep multiband surface photometry on a sample of 24 blue compact galaxies–i. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431(1):102–144.
- [Monnier Ragaigne et al. 2003a] Monnier Ragaigne, D., van Driel, W., Balkowski, C., Boissier, S., e Prantzos, N. (2003a). The properties of low surface brightness galaxies. , 284:917–920.
- [Monnier Ragaigne et al. 2003b] Monnier Ragaigne, D., van Driel, W., Schneider, S. E., Jarrett, T. H., e Balkowski, C. (2003b). A search for Low Surface Brightness galaxies in the near-infrared. I. Selection of the sample. , 405:99–109.
- [Oort 1926] Oort, J. H. (1926). The stars of high velocity.
- [Padovani et al. 2017] Padovani, P., Alexander, D., Assef, R., De Marco, B., Giommi, P., Hickox, R., Richards, G., Smolčić, V., Hatziminaoglou, E., Mainieri, V., et al. (2017). Active galactic nuclei: what’s in a name? *The Astronomy and Astrophysics Review*, 25:2.
- [Paturel et al. 2003] Paturel, G., Petit, C., Prugniel, P., Theureau, G., Rousseau, J., Brouty, M., Dubois, P., e Cambrésy, L. (2003). Hyperleda-i. identification and designation of galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 412(1):45–55.
- [Pellegrini P. S. 1991] Pellegrini P. S., da Costa N. J., D. M. e. a. (1991). *ApJS*, pp. 75.
- [Punsly 2007] Punsly, B. (2007). Three-dimensional simulations of ergospheric disk-driven poynting jets. *The Astrophysical Journal Letters*, 661(1):L21.
- [Punsly e Coroniti 1990] Punsly, B. e Coroniti, F. (1990). Ergosphere-driven winds. *The Astrophysical Journal*, 354:583–615.

- [Robitaille et al. 2013] Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Greenfield, P., Droettboom, M., Bray, E., Aldcroft, T., Davis, M., Ginsburg, A., Price-Whelan, A. M., Kerzendorf, W. E., et al. (2013). Astropy: A community python package for astronomy. *Astronomy & Astrophysics*, 558:A33.
- [Romanishin 1984] Romanishin, W. (1984). 1240-057: Giant jet of colliding galaxies? *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 96(575):24.
- [Salo et al. 2015] Salo, H., Laurikainen, E., Laine, J., Comerón, S., Gadotti, D. A., Buta, R., Sheth, K., Zaritsky, D., Ho, L., Knapen, J., Athanassoula, E., Bosma, A., Laine, S., Cisternas, M., Kim, T., Muñoz-Mateos, J. C., Regan, M., Hinz, J. L., Gil de Paz, A., Menendez-Delmestre, K., Mizusawa, T., Erroz-Ferrer, S., Meidt, S. E., e Querejeta, M. (2015). The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S⁴G): Multi-component Decomposition Strategies and Data Release. , 219:4.
- [Sánchez et al. 2012] Sánchez, S., Kennicutt, R., de Paz, A. G., van de Ven, G., Vilchez, J., Wisotzki, L., Walcher, C., Mast, D., Aguerri, J., Albiol-Pérez, S., et al. (2012). Califa, the calar alto legacy integral field area survey-i. survey presentation. *Astronomy & Astrophysics*, 538:A8.
- [Schweizer et al. 1983] Schweizer, F., Whitmore, B., e Rubin, V. (1983). Colliding and merging galaxies. ii-s0 galaxies with polar rings. *The Astronomical Journal*, 88:909–925.
- [Sekiguchi e Wolstencroft 1993] Sekiguchi, K. e Wolstencroft, R. D. (1992, 1993). Spectroscopic observations of arp-madore interacting galaxies–ii. galaxies with tails, loops of material or debris. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 263(2):349–359.
- [Sipocz 2016] Sipocz, B. (2016). Astroquery: querying astronomical web forms and databases. In *Python in Astronomy 2016*.
- [Tchekhovskoy et al. 2008] Tchekhovskoy, A., McKinney, J. C., e Narayan, R. (2008). Simulations of ultrarelativistic magnetodynamic jets from gamma-ray burst engines. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 388(2):551–572.
- [Tim de Zeeuw et al. 2002] Tim de Zeeuw, P., Bureau, M., Emsellem, E., Bacon, R., Marcella Carollo, C., Copin, Y., Davies, R. L., Kuntschner, H., Miller, B. W., Monnet, G., et al. (2002). The sauron project—ii. sample and early results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 329(3):513–530.
- [Tody 1993] Tody, D. (1993). Iraf in the nineties. In *Astronomical Data Analysis Software and Systems II*, volume 52, pp. 173.
- [Trager et al. 1998] Trager, S., Worthey, G., Faber, S., Burstein, D., e Gonzalez, J. J. (1998). Old stellar populations. vi. absorption-line spectra of galaxy nuclei and globular clusters. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 116(1):1.

- [van Breugel et al. 1983] van Breugel, W., Heckman, T., Bridle, A., Butcher, H., Strom, R., e Balick, B. (1983). Radio and optical observations of the alleged optical jet in da 240. *The Astrophysical Journal*, 275:61–68.
- [Vorontsov 1968] Vorontsov, Arhipova, V. P. (1968). *Morphological Catalogue of Galaxies*, volume volume IV. Moscow: Moscow State University.
- [Vorontsov-Velyaminov 1977] Vorontsov-Velyaminov, B. (1977). Atlas of interacting galaxies, part ii and the concept of fragmentation of galaxies. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 28:1–117.
- [Willick et al. 1997] Willick, J. A., Courteau, S., Faber, S., Burstein, D., Dekel, A., e Strauss, M. A. (1997). Homogeneous velocity-distance data for peculiar velocity analysis. iii. the mark iii catalog of galaxy peculiar velocities. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 109(2):333.
- [Willmer C. N. A. Pellegrini P. S. 1998] Willmer C. N. A. Pellegrini P. S., da Costa N. J., e. a. (1998). *AJ*, pp. 116.
- [Wright et al. 2010] Wright, E. L., Eisenhardt, P. R., Mainzer, A. K., Ressler, M. E., Cutri, R. M., Jarrett, T., Kirkpatrick, J. D., Padgett, D., McMillan, R. S., Skrutskie, M., et al. (2010). The wide-field infrared survey explorer (wise): mission description and initial on-orbit performance. *The Astronomical Journal*, 140(6):1868.

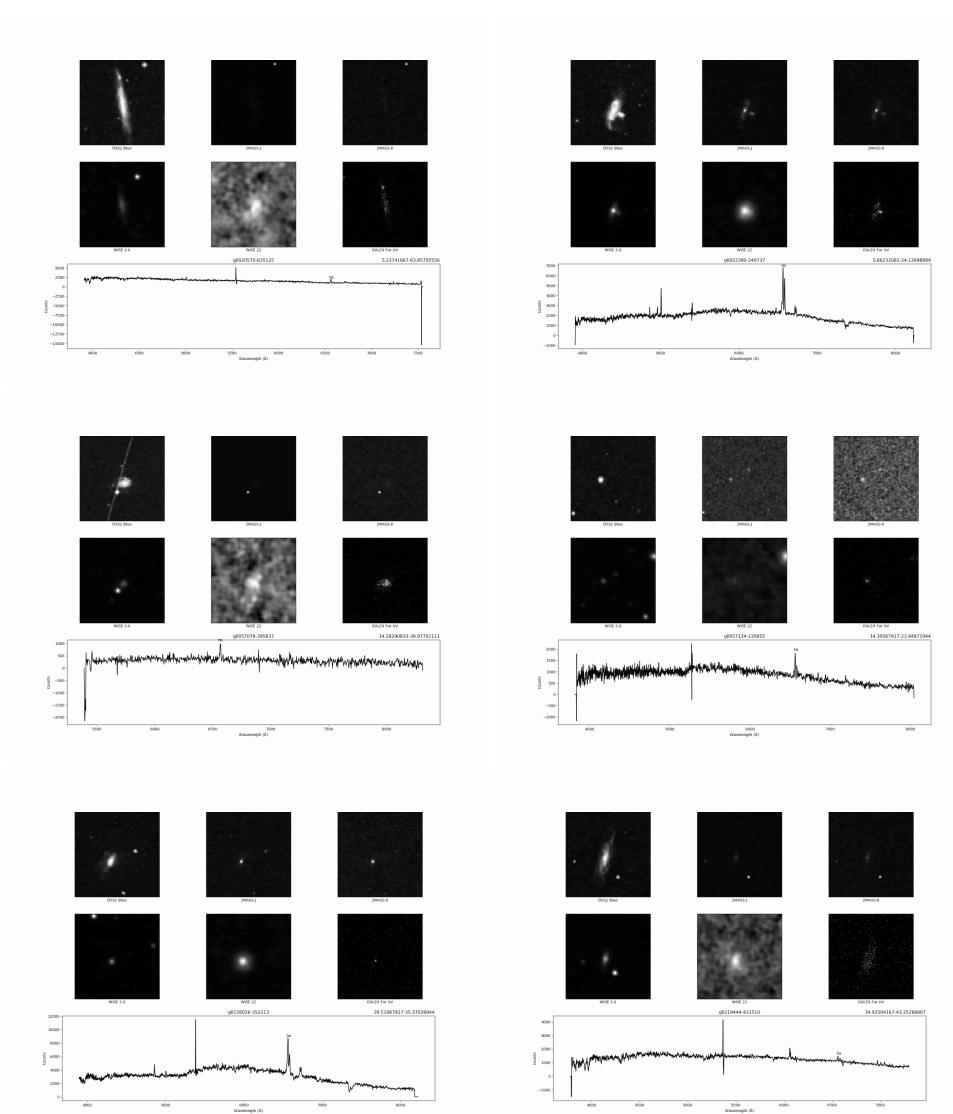
Apêndice A

Galáxias com linhas de absorção.



Apêndice B

Galáxias com linhas de emissão.



Apêndice C

Sínteses Espectrais do Starlight.

