

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo

Estudo do ambiente de interações entre galáxias

Ana Carolina Posses Nascimento

Orientador: Eduardo Telles
Co-Orientadora: Duília Fernandes de Mello

Agosto/2017

Agradecimentos

Não pretendo ser breve.

Vim de uma cidade pequena, Colatina no Espírito Santo, para essa maluquise que é o Rio de Janeiro, com a vontade de fazer Astronomia. Lembro-me de estar no primeiro ano do Ensino Médio e pensar sobre o que eu iria fazer da vida, pois já se havia, nos meus 15 anos, a cobrança de que profissão eu deveria seguir. Já com um gosto por ler sobre os astros, entender o porquê das coisas e ver documentários, pensei na ideia de ser uma astrônoma. Ideia bem maluca até então, afinal, eu nem sabia se isso era possível no Brasil. Porém, quando cheguei no terceiro ano, decidi tornar essa ideia real e me matricular em um curso em Astronomia.

Gostaria de, primeiramente*, agradecer ao apoio e suporte de meu pai Jorge e minha mãe Carmem. Ao contar sobre minha decisão, eles se mostraram inicialmente receosos, porém, em momento algum eles falaram não. Apesar de temerem pela possibilidade de eu morar muito distante, e em uma cidade bastante violenta, eles me apoiaram em todo o momento, e isso se perdura até hoje, não medem esforços fazendo de tudo para que eu possa ter uma confortável vida e atinja meus sonhos. Muito Obrigada, amo vocês!

Agradeço a toda a minha família, meus tios e tios, meus primos e primas, meus avós por todo o carinho dado durante minha vida e o apoio para que eu viesse fazer Astronomia. Em especial, agradeço a minha tia Tânia que muito me apoiou, lembro-me de em 2011 nós pesquisarmos sobre a minha grande curricular que eu teria e discutir sobre as matérias, que ela havia cursado em sua licenciatura. Agradeço também a Tia Fátima e Vitória. Muito Obrigada!

Não esqueço do que aprendi com meus professores no Ensino Fundamental e Ensino Médio. Lembro-me com muito carinho das aulas da Daliana, Jussara, Cintia e Gisele. Gostaria de agradecer ao professor Rodrigo por me ajudar a entender melhor sobre o curso que eu iria seguir, sua animação e suporte foram essenciais para que eu seguisse querendo essa realidade completamente diferente do que eu tinha. Além disso, gostaria de agradecer aos meus amigos Gabriela, Luiz Paulo, Angelo, Natalia Vieira, Natalia Bonna, Rodolfo, Lara, Bruna e Thiago pela amizade. Eu não acredito que a gente

*FORA TEMER

se reuniu um dia para fazer um Twix Gigante. hahaha Torço para que vocês tenham muito sucesso!

Passei para o curso no Rio de Janeiro. Tenho muita sorte por ter sido recebida por veteranos tão maravilhosos! Em muitos momentos de calourisse, se mostraram pacientes e prestativos em me ajudar a entender todos os detalhes do curso, e me aconselhar a fazer ou não fazer determinadas disciplinas. Sou eternamente grata por isso!

Gostaria de agradecer a todo o acolhimento e carinho de minha turma de 2012. O primeiro semestre foi perfeito com todos vocês e espero que cada um consiga obter o sucesso profissional que tanto almejam. Em especial, gostaria de agradecer a amizade da Raquel, eu adorava o seu humor, e do Devanil que em diversas vezes me ajudou a ver as coisas por ângulos diferentes e por me contaminar pela sua eterna paixão pela divulgação científica. Foi um prazer tê-los comigo quando estavam aqui no Rio!

Sinto-me honrada por assistir a aulas de excelentes pesquisadores, que se propoeram a passar todo o conhecimento adquirido nas aulas de Astronomia que tive na graduação. Gostaria de agradecer ao conhecimento passado pelo Helio, Marcelo Asafin, Silvia, Rabaça, Vlad, Adrian, Bragança, Gustavo, Thiago, Wagner e Heloisa. Suas aulas foram de extrema valia a mim. Gostaria de agradecer em especial aos professores Paulo Afrânio e Karin, que além de cursar algumas disciplinas, despertaram meu interesse a galáxias e fizeram escolher a área de Astrofísica Extragaláctica durante minha participação nos Jovens Talentos. Muito obrigada!

Agradeço do fundo do meu coração por conhecer o Tio Elias, com seu humor e delicioso X-Tudo, e Rosa, pela sua enorme capacidade de resolver problemas sem solução no SIGA. aguardo o dia em que vocês serão esculpidos em carrara e expostos por toda a eternidade no Valongo!

Agradeço a Aline, Ariane, Bea, Carolyne, Leticia, Yanna, Stephane e Geisa por podermos por um bom tempo ter um grupo de apoio e discussão sobre diversos assuntos. Guardo com muito carinho tudo que passamos, aprendi muito com vocês, maravilhosas!

Helena, muito obrigada pelo tempo que estive aqui no Rio, morar com você e Nina foi maravilhoso. Stephane, muito obrigada pela companhia, amizade e discussões sobre extragaláctica. Camilita, muito obrigada pela amizade, companhia e zelo. E Geisita, seus conselhos (de Diego e da Lara) foram essenciais nessa reta final, agradeço demais a sua amizade e torço muito por você. Meu sinceros agradecimentos à vocês .

Gostaria de agradecer muito a meus orientadores:

A Duília que, apesar da distância, se propôs a me incluir em seu projeto inicial BIDHU e a me levar a AAS, o que posteriormente me proporcionou conseguir uma bolsa de IC. Quando eu estava no meu último ano de ensino médio, poucas as informações eram disponíveis sobre o curso e a vida de um astrônomo. Ler um livro de uma mulher astrônoma que explicava sobre como funcionava a carreira foi extremamente inspirador para que eu decidisse cursar a astro. Seu apoio e carinho foram muito importantes para mim.

Ao Eduardo que, seguindo meu projeto iniciado, me ajudou a aprender muito sobre galáxias e foi crucial no meu amadurecimento científico. Guardo com carinho todos seus conselhos e puxadas de orelha, muitas vezes necessárias, e todo o tempo que passamos quebrando a cabeça com o SExtractor e com o suado trabalho em classificar nossos objetos. Muito do meu conhecimento em extragaláctica foi adquirido durante esses dois últimos anos de iniciação científica. Portanto, meu muito obrigada!

Durante o projeto, tive o apoio de diversas pessoas de nosso grupo do BIDHU. Muito obrigada a Rocio, ao Walysson e ao pessoal de São Paulo, Airtton, Sandra e Milton. Desenvolvemos um maravilhoso projeto juntos! Agradeço também a Yolanda e Marco que se dispuseram a ler meu trabalho e a dar sugestões de como melhorá-lo. Meu muito obrigada!

Disse que não ia ser breve, e não fui. A carreira em Astronomia é cheia de pedras, de vez em quando temos que ouvir alguns desaforos e a cobrança é pesada. Aprendi nesses últimos anos, em que estive respirando essa carreira 24 horas, que o apoio e suporte tanto emocional quanto profissional é imprescindível. Portanto, gostaria de agradecer a todos que tiveram contato comigo e que pudemos trocar algum tipo de experiência. Agradeço demais a todos esses anos que estive na graduação.

Deixei para o fim minha maior felicidade nesses últimos anos. Pedro, muito obrigada pela sua companhia. Você é o melhor amigo e melhor namorado que eu pude ter. Seu humor, seu soninho e seu suporte foram essenciais em todos os momentos bons e difíceis que passamos juntos. Eu agradeço demais ter a sua companhia e a do Morpheu nesses anos de graduação e espero tê-la no anos que se seguem. Te amo!

Resumo

No processo evolutivo de galáxias, eventos de interações gravitacionais se mostram frequentes e modificam as estruturas dos sistemas iniciais. Um dos possíveis produtos gerados é a acumulação de gás e estrelas, com propriedades similares a de galáxias anãs, nas caudas mareais produzidas pelo evento. Levando em consideração o atual modelo cosmológico de formação de estruturas, concluímos que esses episódios de interações possuem papel fundamental na formação e estruturação no Universo. Entretanto, apesar da atual cosmologia se adequar à distribuição em largas escalas, a teoria apresenta dificuldade em explicar o que se é observado em pequenas escalas. Ao se analisar a presença de galáxias anãs no ambiente de galáxias massivas, observa-se que há uma discrepância no número de galáxias encontradas e no que se é esperado por modelos teóricos.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo dos ambientes de galáxias em interação, focando-se na busca de galáxias anãs fruto da colisão. Desejamos comparar a vizinhanças de galáxias em interação com as vizinhanças de galáxias de campo.

Inicialmente, desenvolvemos a busca de pares de galáxias no SDSS por um critério de seleção que não exigisse uma grande demanda computacional. De um resultado total de aproximadamente 40000 candidatos a pares encontrados, escolhemos os pares que nos permitissem encontrar, em suas vizinhanças, regiões de formação estelar recente, segundo nossas limitações observacionais.

Das galáxias selecionadas, buscamos imagens para o ultravioleta próximo e distante coletadas pelo telescópio GALEX. Das imagens dos 8 pares finais selecionados, realizamos a detecção de fontes de radiação ultravioleta em um campo de 500 x 500 kpc, centrado no par. Os objetos encontrados, pela utilização do programa SExtractor, sofreram um processo de classificação que nos permitiu obter apenas candidatas a galáxias anãs.

Nosso objetivo final foi identificar excessos de fontes ultravioleta nas vizinhanças dos pares, ao se analisar o comportamento das cores dos objetos e as densidades superficiais para grupos de controle e com a distância ao par. Mostramos que, para nossos pares, não observamos um excesso de cor azul ou uma grande contagem de objetos, não permitindo supor um efeito causal entre os eventos de interação e as galáxias anãs identificadas. Discutimos os possíveis motivos que influenciaram os resultados obtidos.

Contents

Sumário	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
2 Interações entre galáxias	5
2.1 Fusões	6
2.1.1 Fusão <i>major</i>	6
2.1.2 Fusões <i>minor</i>	10
2.2 Outras formas de interação	11
2.2.1 Fricção Dinâmica	11
2.2.2 Encontros em altas velocidades e Assédio galáctico	12
2.2.3 Pressão de arrasto e estrangulamento	13
3 Galáxias anãs	15
3.1 Importância	16
3.2 Definição e Classificações	17
4 O problema das galáxias faltantes	21
4.1 Evidências para matéria escura	21
4.2 Λ CDM	25
4.3 Modelo hierárquico de formação de estruturas	27
4.4 Satélites faltantes	31
5 Galáxias anãs mareais	35
5.1 Conceito	36
5.2 Forças de maré e formação de caudas mareais	36
5.3 Componentes das caudas mareais	38

5.4	Formação de Tidal Dwarf Galaxies	39
5.4.1	Instabilidades locais nas componentes estelares ou gasosas . .	39
5.4.2	Ejeção de nuvens instáveis de gás molecular	40
5.4.3	Modelo de formação monolítico	40
5.4.4	Modos de compressão em forças mareais	40
5.5	Ambientes de grupos compactos	41
6	Método de seleção da amostra	47
6.1	Motivação e objetivos	47
6.2	Métodos de identificação de pares em <i>Big Data</i>	48
6.3	Sloan Digital Sky Survey	50
6.4	Critérios de identificação de pares	51
6.4.1	Sistema de coordenadas equatoriais	52
6.4.2	Triangulação esférica	54
6.4.3	Separação angular	55
6.4.4	Critérios de seleção e limitações	55
6.5	Execução método BIDHU	56
6.5.1	Teste de método	57
6.5.2	Contaminação da amostra	58
6.5.3	Aplicação do método para todo o céu	59
6.6	Critérios ambientais	60
6.6.1	Distância de separação entre pares e entre sistema e observador	60
6.6.2	Critérios e resultados	62
6.7	Extração das imagens GALEX	63
6.7.1	GALEX	65
6.7.2	Vizinhança dos pares	66
6.8	SExtractor	69
6.8.1	Funcionamento do programa	69
6.8.2	Aplicação do programa nas imagens	72
6.8.3	Fotometria global x Fotometria local	72
7	Classificação de fontes detectadas	75
7.1	Classificação entre estrelas e galáxias	75
7.2	Correlação entre SDSS e SExtractor	78
7.3	Classificação cruzada	79
7.4	Classificação estrutural e empírica	82
8	Resultados e Discussão	89
8.1	Descrição da análise	90
8.2	Densidade Numérica	91
8.3	Cores com relação ao par	94
8.4	Distribuição FUV - NUV	98
8.5	Discussão	101

9	Conclusões e Perspectivas Futuras	105
	Referências Bibliográficas	107

List of Figures

2.1	Composição de diferentes estágios de evolução de uma fusão a partir de imagens do <i>Hubble</i>	7
2.2	Relação entre a energia orbital e momento angular como critério para a fusão de galáxias. Órbitas acima da linha sólida são proibidas. Órbitas com energia orbital e momento angular maior que a linha tracejada geram fusões com tempo maior do que tempo de <i>Hubble</i> . Quanto menor o momento angular e a energia orbital, menor é o tempo para a fusão se finalizar. Crédito : Mo, van der Bosch & White (2010).	8
2.3	Hernquist & Mihos, 1995 simularam um evento de acreção de galáxia satélite para razão 10 : 1. A sequência superior ilustra a interação vista frontalmente e a sequência inferior ilustra o mesmo processo porém com visão de perfil. Devido a elevada densidade, a parte nuclear da galáxia satélite sobrevive ao processo de rompimento. As partes mais externas são retiradas e acretadas ao interior da galáxia espiral. Nota-se que o disco galáctico é perturbado mas ao fim do processo ele não perde completamente suas características.	10
2.4	Mesmo que uma galáxia não colida com os objetos a sua volta, pode ocorrer uma transferência de energia de forma que esses objetos sejam atraídos para o caminho anteriormente percorrido pela galáxia. A concentração de objetos pode gerar uma componente de oposição ao movimento da galáxia, realizando uma desaceleração de sua velocidade orbital	12
3.1	Diagrama de Hubble. Classificação de objetos a partir de análise de morfologia. Galáxias à esquerda apresentam altas dispersões de velocidades internas e populações estelares antigas. Galáxias à direita representam galáxias compostas de regiões de formação estelar recente. Galáxias irregulares apresentam morfologia sem padrão e fortes formações estelares	16
3.2	Função de luminosidade para o Universo Local, sendo $z \lesssim 0.05$. Para altas luminosidades, temos um bom ajuste da função de luminosidade de <i>Schechter</i> . Apesar de que o ajuste não esteja ideal para as regiões de baixa luminosidade, podemos inferir que existe uma fração maior de objetos compostos por baixa massa do que objetos de maior massa.	17

- 3.3 Diagrama, produzido por Mo et al. (2010), representando relações entre o raio de uma galáxia anã e sua magnitude absoluta na banda B, separando nas diferentes classificações existentes. Os objetos mais fracos são as anãs esferoidais (dSph's) e as anãs ultra compactas (UCD). Para magnitudes mais brilhante e maiores raios, encontramos as anãs irregulares. Para magnitudes semelhante porém menor tamanho, encontramos as anãs elípticas (dE's) e compactas elípticas (cD's). Para efeito de comparação são representados as localidades de galáxias espirais e elíptica massivas. 18
- 3.4 Correlação entre a magnitude absoluta e o raio efetivo para galáxias anãs (à esquerda) e correlação entre a magnitude absoluta e o brilho superficial no raio efetivo (à direita). As linhas tracejadas demarcam as magnitudes de $M_B = -18$ e $M_B = -20.5$. Crédito: Dados combinados de Graham and Guzmán (2003) e Bender et al. (1992). 19
- 3.5 À esquerda, encontra-se NGC 205, uma Anã Elíptica satélite de Andromeda. À direita, encontra-se a Anã Esferoidal NGC147, também galáxia satélite de Andromeda. Ambas as imagens são capturas do levantamento 2MASS 20
- 3.6 À esquerda, encontra-se uma galáxia HII denominada UGC 11411. À direita, encontra-se a galáxia anã irregular NGC 1427A. Ambas as imagens são capturas do telescópio Hubble 20
- 4.1 Resultado de Leavitt (1913) na análise de 25 estrelas variáveis localizadas na Nuvem de Magalhães. No eixo das abcissas encontra-se os valores para o logaritmo do período observado e no eixo das ordenadas, encontra-se os valores de magnitude aparente. Foram realizados ajustes lineares, sendo o ajuste superior referente a magnitude máxima atingida e o ajuste inferior referente a magnitude mínima atingida pela pulsação. É possível notar que o logaritmo do período e a magnitude estabelecem relação linear. Pelo fato de que os objetos estão a aproximadamente a mesma distância, essa relação traduz em uma linearidade entre o período de oscilação e a luminosidade das estrelas. 22
- 4.2 Velocidades rotacionais de 7 galáxias pertencentes a amostra de Rubin et al. (1978) com relação a distância ao núcleo. Observa-se para as menores distâncias um elevado aumento da velocidade rotacional até atingir um pico. É possível notar diversos comportamentos em diferentes galáxias. Para NGC 4594, notamos que com o fim do crescimento exponencial, a velocidade rotacional permanece crescendo com o raio de forma aproximadamente linear. No caso de NGC 4378, a velocidade a partir de 5 kpc permanece aproximadamente constante, com um leve decaimento. Segundo a dinâmica kepleriana, as velocidades rotacionais deveriam cair com a distância de forma $v \propto r^{-1}$ 24
- 4.3 Representação espacial de um corte de quatro graus do levantamento astronômico *2dF Galaxy Redshift Survey*. 25

- 4.4 Resultado de simulações numéricas desenvolvidas por Eke et al. (1996) da densidade numérica em função da massa, para diferentes *redshifts*. No gráfico, observamos a representação de 3 cosmologias distintas. A linha sólida representa um Universo dominado pela matéria escura ($\Omega_0 = 1$), a linha pontilhada representa um Universo sem energia escura, e 30% de matéria escura. A linha tracejada representa um Universo composto de 30% de matéria escura e o restante composto de energia escura. Para cada cosmologia, é representado os resultados para $z = 0.5$, $z = 0.33$ 30
- 4.5 Função cumulativa de número de halos em função da velocidade rotacional máxima dentro de uma esfera de raio m . As linha sólidas e tracejadas mais representa aglomerados e galáxias simuladas, respectivamente. Os pontos representam as velocidades para o aglomerado de Virgo e a linha pontilhada representa a função cumulativa para a Galáxia. É possível observar a concordância entre os dados de aglomerados observados e simulados, porém uma grande diferença para observações de galáxias anãs e simulações 32
- 5.1 Exemplo de quatro galáxias encontradas no Atlas de Galáxias Peculiares. Da esquerda para direita: Arp 97/UGC 7085A, par em interação o qual é ligado por uma estrutura filamentosa de gás e estrelas denominada ponte; Arp 241/UGC 9425 apresenta caudas mareais no sentido oposto à interação; Arp 243/NGC 2623 é um par em estao avançado de fusão apresentando caudas mareais no sentido oposto à interação; finalmente Arp 244, popularmente conhecida como Antena, encontra-se em estágio final de fusão, com uma longa cauda mareal. 35
- 5.2 Duc and Renaud (2011) realizaram uma compilação de galáxias em processo de interação tornando evidentes as componentes estelares antigas, em cores óticas, e as componentes de hidrogênio atômico em azul. É possível observar que o hidrogênio molecular compõe majoritariamente a estrutura de uma cauda mareal. As imagens no ótico não necessariamente nos fornecerão dimensão real da extensão de uma cauda mareal. 38
- 5.3 Renaud et al. (2009) simula encontro entre duas galáxias as quais evoluem para um sistema similar ao que se observa da galáxia Antena. Cada quadrante representa um momento da evolução a cada 50 milhões de anos. Os pontos vermelhos representam partículas que estão em estado completo de compressão. 41
- 5.4 Imagem na banda NUV do telescópio GALEX de parâmetros $10' \times 10'$. Os objetos detectados intragrupo encontram-se círculados em preto e identificados por números de 1 a 16. As curvas contínuas brancas representam curvas de contorno para emissão de HI. Podemos notar que na região central e quadrante sudeste da imagem há a presença de gás de hidrogênio atômico. 42
- 5.5 Histogramas mostrando as distribuições FUV - NUV. As linhas sólidas são relativas as regiões intragrupos e as linhas tracejadas são relativas as regiões de controle. No canto superior esquerdo temos o indicativo de qual par o gráfico menciona e no canto superior esquerda temos informações sobre as médias e os desvios padrões em parênteses. 44

5.6	Reprodução de Torres-Flores et al. (2009) sobre o grupo compacto HCG 92. Os objetos identificados encontram-se destacados em círculos vermelhos numerados de 1 a 36. Observamos uma grande quantidade de objetos (18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27) dispostos em uma região de grande emissão de radiação ultravioleta, identificada como uma cauda mareal.	45
6.1	Eficiência quântica dos filtros do Sloan. Da esquerda para direita, observamos respectivamente a resposta para as bandas u , g , r , i e z	52
6.2	Representação da intersecção de um plano dividindo em duas regiões simétricas, resultando em um círculo máximo. Considera-se que os astros estão distribuídos na superfície da esfera. C1 e C2 representam as coordenadas do sistema equatorial. Nota-se que a definição dos círculos máximos serão base para o determinação nessas coordenadas.	52
6.3	Representação ilustrativa do Sistema de Coordenadas Equatoriais. O círculo maior assinalado em azul identifica o plano equatorial. O círculo maior pontilhado representa o plano da eclíptica. A intersecção entre esses planos dá origem ao sistema de coordenadas, denominado como ponto vernal. As estrelas e galáxias se dispõem na superfície da esfera imaginária. Os ângulos assinalados são as coordenadas equatoriais ascensão reta e declinação.	53
6.4	A intersecção entre 3 círculos máximos origina um triângulo esférico. a , b e c representam arcos cujo raio é igual ao raio da esfera e α , β e γ representam os ângulos entre as intersecções.	54
6.5	Determinamos a separação angular entre os pontos A e B utilizando as coordenadas equatoriais (α_a, δ_a) e (α_b, δ_b) , respectivamente. Os pontos A, B e PN (polo norte) formam um triângulo esférico o que torna possível utilizar as leis discutidas em 6.4.2 para encontrar θ . Fonte: Boscko	55
6.6	Três exemplos de contaminações encontradas durante a inspecção visual. À esquerda notamos que regiões de formação estelar dentro de uma única galáxia são classificadas como galáxias isoladas. Devido a proximidade, são identificados erroneamente como candidatas a interação. No centro, observa-se uma estrela saturada cuja fotometria não é confiável levando a classificação de galáxia. À direita, um exemplo de estrela binárias também classificadas erroneamente como galáxias	59
6.7	Disposição espacial adotado no cálculo de separação angular entre dois objetos astronômicos. Devido a grande distância entre a Terra e o sistema, podemos adotar um posicionamento por triângulo retângular a fim de simplificação.	61
6.8	O SDSS utiliza o <i>SExtractor</i> como forma de detecção de fontes. Esse programa possui um classificador interno que determina se um objeto é pontual ou extenso. Algumas galáxias possuem regiões de formação estelar evidentes levando ao <i>SExtractor</i> interpretar como uma fonte extensa isolada. Apresentamos dois exemplos de falsos positivos. As fontes detectadas estão separadas respectivamente por $S_{esquerda} = 6.5783$ kpc e $S_{direita} = 6.5744$ kpc	63
6.9	Comparação entre o espectro de um corpo negro e o espectro observado em uma estrela característica. A presença de linhas de absorção são resultado da interação de fótons advindos do núcleo com a atmosfera composta de gases frios	65

6.10	Composição das imagens FUV e NUV o par 1. A seta vermelha indica o centro da imagem e a cruz roxa representa a localização do par.	66
6.11	Campos dos pares 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A coluna esquerda apresenta os campos para as imagens do SDSS, a coluna central representa os campos para as imagens NUV do GALEX, o vetor vermelho duplo representa a distância angular de 1', e a coluna direita apresenta o par central segundo imagens do SDSS . . .	68
6.12	Campos dos pares 5, 6, 7 e 8, respectivamente. A coluna esquerda apresenta os campos para as imagens do SDSS, a coluna central representa os campos para as imagens NUV do GALEX, o vetor vermelho duplo representa a distância angular de 1', e a coluna direita apresenta o par central segundo imagens do SDSS . . .	70
6.13	Exemplo de ramificação no processo de decisão de um conjunto de píxels adjacentes são um ou mais objetos	71
6.14	Ilustração de uma possível região anular para o cálculo local da contribuição de céu. Essa contribuição será extraída do objeto e posteriormente será realizado sua fotometria.	72
6.15	Gil de Paz et al. (2007) analisou a distribuição de cores para galáxias próximas ao Grupo Local disponíveis na missão <i>Nearby Galaxy Survey</i> . Podemos inferir pelo histograma que as galáxias permanecem majoritariamente próximas a $FUV - NUV \simeq 3\text{mag}$ com uma cauda atingindo valores próximos de 3 mag.	73
6.16	Correlação entre as cores FUV-NUV a partir da fotometria obtida por método global e local. Em suma, observamos uma concordância entre a medições, as cores obedecem uma relação linear. A partir de $FUV - NUV = 2$, diversos pontos demonstram uma elevada discrepância entre os dois métodos fotométricos. Seguimos a distribuição de Gil de Paz et al. (2007) analisando apenas regiões com cores abaixo de 2. Identificamos dispersão	74
7.1	Annunziatella et al. (2013), simulando galáxias e estrelas em um mesmo campo, testou a performance do programa SExtractor em relação a diferenciação entre objetos. Pontos em azuis em formato x representam estrelas e pontos rosas representam galáxias Podemos notar que a classificação é fiel para pequenas magnitudes, porém, à medida que a magnitude cresce, a classificação torna-se cada vez menos acurada.	76
7.2	Relação entre o parâmetro classificador e a magnitude NUV do par 5. Os outros pares mostram distribuições semelhantes. Não observamos duas aglomerações discrepantes que nos permita escolher um valor de separação confiável.	77
7.3	Relação entre o parâmetro classificador produto da imagem NUV e da imagem FUV. Não observamos uma linearidade entre os parâmetros, mostrando-nos que CLASS_STAR não representa um bom fator para classificar nossos objetos. . .	78
7.4	Temos a representação em um diagrama cor-magnitude de 70000 galáxias do SDSS produzido por Baldry et al. (2004). Observamos duas modas nas curvas de nível nos indicando que existem duas populações diferentes em na amostra. .	80

7.5	Diagramas cor-cor resultado do cruzamento de objetos de Bianchi et al, 2007. Os pontos são assinalados segundo a classificação resultante do Sloan. Pontos azuis indicam objetos pontuais e pontos pretos indicam objetos extensos. Os modelos de cor estão assinalados por símbolos de diferentes cores, os modelos são citados na legenda do gráfico. Apenas estão presentes os objetos com erros fotométricos menores que 0.15 mag(0.10 mag) na banda FUV (NUV)	82
7.6	Annunziatella et al, 2012 simulou uma lista de objetos compostos de estrelas e galáxias e realizou o procedimento de fotometria com as rotinas mais populares em astronomia. No caso da combinação SExtractor+PSFex, 4 diferentes abordagens tornam possível a classificação entre objetos. A relação da magnitude com abertura Kron com o parâmetro <i>CLASS_STAR</i> (painel a), <i>half-light radius</i> (painel b), μ_{max} (panel c) ou <i>spread model</i> (painel d) permitem distinguir estrelas (cruz azul) de galáxias (pontos roxos)	85
7.7	Seguindo a análise de Annunziatella et al., produzimos as relações entre a magnitude NUV com, respectivamente, o raio eficiente, o brilho superficial e o parametro <i>spread model</i> . Nos gráfico encontram-se representados dos os objetos detectados dos 8 pares. Somos capazes de estabelecer critérios para eliminação de estrelas.	86
7.8	Nuvem de cores dos objetos da amostra de referência do SDSS.	87
8.1	Correlação entre as densidade superficiais numéricas com a distância ao par. As populações foram divididas com relação a distância ao centro do sistema. Distribuímos os valores da divisão entre a contagem de objetos pela área analisada, com relação a distância média dos anéis. O ajuste linear em azul identifica se é possível observar regiões com alta quantidade de objetos	93
8.2	Correlação entre as cores FUV - NUV e NUV - r com relação a distância ao par para os sistemas 1 a 4. O objetos foram divididos de acordo com suas distância ao centro do sistema e, para cada subconjunto, as médias das cores foram tomadas e correlacionadas com as distâncias médias de cada anel.	95
8.3	Correlação entre as cores FUV - NUV e NUV - r com relação a distância ao par para os sistemas 5 a 8.	96
8.4	Na coluna esquerda, encontram-se os histogramas que demonstram a distribuição das cores FUV - NUV para a população dos pares, em cinza, e a população de controle, em azul, de 1 a 4. Na coluna direita, encontram-se os respectivos campos detectados com objetos detectados assinalados por circunferências. (continuação legenda próximo histograma)	99
8.5	Casos de 5 a 8 . (continuação) As circunferências que possuem cor azul indicam objetos cujas cores FUV - NUV estão acima da média. Circunferências cores pretas indicam objetos cujas cores FUV - NUV estão abaixo da média de controle.	100
8.6	Exemplos de galáxias que nao atendem nossos critérios de seleção porém apresentam estruturas capazes de comportar galáxias anãs. Suas localizações sao assinaladas nas imagens.	102

List of Tables

5.1	Reproduzimos nesta tabela os resultados de Torres-Flores et al. (2009) a partir da análise das densidade numéricas dos grupos. A primeira coluna identifica a qual grupo pertence a densidade numérica. A segunda coluna nos dá o valor encontrado da densidade numérica com seu respectivo erro e as demais colunas referem-se a densidade numérica dos campos de controle	43
6.1	Valores do comprimento de onda médio e magnitude limite associadas as bandas <i>ugriz</i> do SDSS.	51
6.2	Informacoes sobre as missoes do telescópio GALEX	65
6.3	Informações sobre as galáxias de cada par identificado.	66
6.4	Informações sobre as bandas espectrais disponíveis pelo GALEX e as suas respectivas imagens. Encontram-se apresentadas o intervalo de comprimento de onda capaz de ser detectado, juntamente com o comprimento de onda efetivo λ_{eff} . Com relação as imagens, apresentamos as resoluções angulares para das bandas NUV e FUV e o ponto zero para as magnitudes dos objetos detectados.	66
6.5	Informações sobre as galáxias de cada par identificado.	67
7.1	Resultado da correlação entre os catálogos do SExtractor e SDSS	79
7.2	Resultado da classificação de nossa amostra segundo a classificação de Bianchi et al. (2007).	83
7.3	Resultado da classificação de nossa amostra segundo os parâmetros estruturais e translação empírica	88
8.1	Dispomos na tabela os centros das regiões de controle circulares utilizadas para identificar excessos de emissão ultravioleta em regiões de pares em interação. Cada imagem é centrada em um galáxia solitária, que é identificada pelas suas coordenadas equatoriais e velocidades de recessão.	91
8.2	Estruturação do resultado das densidades numéricas superficiais para os pares de galáxias e seus respectivos grupos de controle. Σ indica o valor final da densidade numérica, com índices relacionados ao objeto. GC é referente a identificação dos grupos controle.	92

Lista de Abreviações

Λ CDM Lambda Cold Dark Matter

BIDHU BIg Data of the Huge Universe

FUV Far ultraviolet (Ultravioleta distante)

GALEX Galaxy Evolution Explorer

IRAF Image Reduction and Analysis Facility

MAST MultiMission Archive at Space Telescope Science Institute

NUV Near ultraviolet (Ultravioleta próximo)

SDSS Sloan Digital Sky Survey

SQL Structured Query Language

TDG Tidal Dwarf Galaxies

Chapter 1

Introdução

O Grupo Local, onde localiza-se a Via Láctea e Andromeda, possui ~ 50 galáxias anãs confirmadas Wetzell et al. (2015). Devido a sua fraca luminosidade e baixo brilho superficial, são objetos de difícil detecção, principalmente em sistemas extragalácticos. Portanto, nosso conhecimento sobre suas características dinâmicas, fotométrias e químicas são inferidas pelo estudo das estruturas localizadas dentro do Grupo Local.

Observando o halo galáctico, podemos inferir que este é composto principalmente de aglomerados globulares e estrelas de população do tipo II. Porém, Jurić et al. (2008) identificou um excesso de estrelas de sequência principal na direção da constelação de Virgo, ao construir uma distribuição tridimensional de densidade de ~ 48 milhões de estrelas do halo obtidas pelo levantamento *Sloan Digital Sky Survey*. Por esse motivo, essa distribuição recebeu o nome de sobredensidade de Virgo. Outras sobredensidades também são identificadas, como o *Anel de Monoceros* (Newberg et al. (2002)) e *Sagittarius Stream* (Newberg et al. (2002); Majewski et al. (2003)). Pela disposição filamentosa em forma de cauda e pela presença de galáxias anãs ao redor da Galáxia, acredita-se que essas regiões são formadas de material de antigas galáxias anãs que sofreram um processo de ruptura, graças à interação com a Via Láctea.

No halo galáctico, também podemos observar o aglomerado de ω Centauri, com curiosas propriedades que despertam um interesse único na descrição de sua natureza. Dentre suas peculiares propriedades, podemos citar um achatamento atenuado em comparação ao de um aglomerado globular típico (Meylan (1987)), uma multi-modalidade em sua distribuição de metalicidade (Norris et al. (1996)) indicando diferentes épocas de formação estelar e órbita retrógrada com respeito à rotação galáctica (Dinescu et al. (1999)). Suas características levam a hipótese de que ω Centauri é um núcleo sobrevivente de uma galáxia anã satélite que, anteriormente a formação do disco fino da Galáxia (Quinn et al. (1993)), foi acretaada pela Via Láctea perdendo seu envelope externo. ω Centauri nos dá um exemplo de como uma galáxia anã pode influenciar nas propriedades internas das galáxias em que orbitam.

De acordo com análises observacionais, acredita-se que as galáxias anãs populam as redondezas de galáxias massivas e seu destino seja a destruição e posterior acreção no poço potencial da galáxia hospedeira. Apesar da maior parte dos esforços na Astrofísica Extra-

galáctica ser destinado ao estudo de galáxias pertencentes ao tradicional *Diagrama de Hubble*, o estudo da formação e evolução de galáxias anãs nos dão pistas cruciais sobre o entendimento da progressão das estruturas de todo o Universo.

O modelo cosmológico atualmente adotado, Λ CDM, debruça-se no paradigma de formação hierárquica de estruturas. Ao contrário do que se pensava na década de 60, as galáxias observadas no Universo recente não são fruto da fragmentação de uma grade nuvem de gás primordial (Eggen et al. (1962)). As galáxias e demais estruturas formaram-se de colapsos de subestruturas em pequenas escalas as quais, com o tempo, interagiram-se entre si gerando estruturas em largas escalas. A gênese de galáxias anãs está na sobrevivência de subestruturas após adentrarem em estruturas de maiores proporções. O colapso dessas subestruturas, denominados subhalos, geraram as galáxias anãs da forma como observamos.

Entretanto, apesar do modelo de evolução do Universo governado pela matéria escura obter sucesso na descrição de notórios fenômenos, simulações numéricas predizem uma densidade numérica de subhalos muito maior do que se é observado. Essa discrepância entre teoria e observação movimentou a comunidade científica a explicar o porquê dos subhalos serem ineficientes no resfriamento e colapso da matéria bariônica, e a identificar as escalas de massa nas quais essa eficiência se manifesta. Essas questões estão em aberto e movimentarão os estudos nas próximas décadas. Porém, é importante enfatizar que, apesar das discrepâncias em baixas escalas, o modelo atual cosmológico de formação do Universo obtém extraordinária capacidade de explicar a evolução das estruturas em largas escalas.

A origem de galáxias anãs não é restrita a acreções no âmbito de halos de matéria escura. Mirabel et al. (1992) realizou a primeira detecção de uma estrutura auto-gravitante fruto da interação entre duas galáxias espirais, cujas características se assemelham as propriedades encontradas em galáxias anãs típicas. Essa proposta de formação já havia sido feita por Zwicky (1956) e posteriormente seguida por Schweizer (1978). Porém, apenas nas duas últimas décadas, a formulação teórica e manipulação de simulações de N-corpos foram utilizadas de forma a compreender esse novo mecanismo de formação. O fenômeno físico que governa todo o processo é a presença de campos mareais durante a colisão das galáxias progenitoras massivas.

Diante de todas as informações disponíveis, nos perguntamos a respeito do ambiente no qual uma galáxia espiral está inserida e no destino e influência desse ambiente quando duas galáxias inicialmente isoladas sofrem processos de interação. A contagem de objetos de baixa luminosidade em sistemas externos ao Grupo Local mostra-se desafiadora devido a nossa atual limitação observacional. Seria apenas observacional a causa para não identificarmos compatíveis quantidades de galáxias satélites com os modelos teóricos? Além disso, supondo que galáxias anãs possam ser formadas por um processo de interação entre galáxias, não necessariamente dominante, qual a nossa capacidade de identificar esses objetos em ambiente de fusões?

Esse trabalho de conclusão de curso descreve todos os passos realizados para uma tentativa de conhecimento do ambiente de interação de galáxias. Nosso objetivo é testar a hipótese de que grandes interações entre galáxias massivas possam produzir como consequência a formação de aglomerações estelares ou de gás, que posteriormente se tornarão galáxias anãs. O estudo foi desenvolvido em duas etapas principais.

A primeira etapa consistiu na definição da amostra de galáxias a ser analisada. Iniciamos um projeto denominado *Big Data of The Huge Universe* (BIDHU) cujo objetivo fundamental

encontra-se em desenvolver e aplicar um método simples para identificação de pares de galáxias em grandes levantamentos astronômicos. A quantidade de dados disponíveis exigem uma abordagem computacionalmente eficiente. Atualizamos a forma de detecção ministrada por Allam et al. (2004), baseando-se em seus princípios como a escolha de parâmetros angulares como critérios de seleção.

Com os resultados preliminares, realizamos um estudo em uma subamostra do catálogo gerado pelo BIDHU, composto de candidatas a galáxias em interação. A subamostra foi designada sob critérios observacionais que possibilitam a identificação de galáxias anãs nesses ambientes de interação. À seguir, definimos o limite de vizinhança necessário para identificarmos produtos da colisão e utilizando as imagens do telescópio GALEX, ministramos identificação e fotometria de fontes de radiação no ultravioleta. Após extensa discussão sobre critérios de classificação das fontes detectadas, fomos capazes de aplicar nosso teste de hipótese.

Os próximos capítulos descrevem o estudo dos ambientes em interação e a condução da metodologia. No Capítulo 2, estudamos os tipos de interações que ocorrem no Universo, suas condições de ocorrência e consequências. No Capítulo 3, descrevemos brevemente a importância e propriedades de galáxias anãs, baseadas principalmente nos estudos das galáxias satélites no Grupo Local. Os capítulos 4 e 5 discutem individualmente a formação de galáxias anãs pois esse tópico possui extrema relevância a esse projeto. O capítulo 4 foca-se na compreensão das propriedades da matéria escura, o modelo cosmológico e consequente modelo de formação de estruturas. Por fim, o capítulo finaliza discutindo o problema de galáxias faltantes no Λ CDM, ou, *Missing satellite problem*. O capítulo 5 trata-se do estudo e descrição da formação de caudas mareais em galáxias em fusão e a consequente formação de galáxias denominadas *Tidal Dwarf Galaxies*. O capítulo 6 descreve os critérios e metodologia desenvolvidos pelo projeto BIDHU. Nos capítulos 7 classificação morfológica entre os objetos. Finalmente, o capítulo 8 testa a hipótese feita e seus resultados e o capítulo 9 apresenta as conclusões e perspectivas futuras.

Chapter 2

Interações entre galáxias

Interações são eventos fundamentais no processo de evolução de galáxias. Em meados da década de 1960, acreditava-se que a formação e desenvolvimento de galáxias ocorriam de maneira individualizada pelo colapso de grandes nuvens de gás e poeira (Eggen et al. (1962)). Porém, essa teoria foi gradativamente descartada com o surgimento de inúmeras evidências para a existência de uma matéria não observável, que exerce forte influência gravitacional em diversos ambientes observados (por exemplo, Zwicky (1933); Rubin et al. (1978)). Na década de 80, a consolidação do conceito de matéria escura nos levou a concluir que ela é fator chave no processo de formação de estruturas (Press and Schechter (1974)). A matéria escura protagoniza o modelo de formação hierárquico, o qual propõe que os complexos extragalácticos que observamos no Universo recente são frutos de fusões de concentrações de matéria em menores escalas. Inicialmente, a maior parte dos halos de matéria escura possuíam uma concentração de massa inferior ao que observamos em sistemas no Universo Local. Portanto, as interações são eventos cruciais pois possibilitaram que estruturas aumentassem suas escalas.

Os halos de matéria escura definem-se como sobredensidades de partículas em equilíbrio termodinâmico, cuja natureza é desconhecida até então. Porém, os halos também são compostos, em menores frações, de matéria bariônica que é formada por átomos e moléculas. Caso ocorram eficientes processos de resfriamento, esse tipo de matéria colapsará na região central da esfera e gerará uma galáxia (Croton et al. (2006)). Porém, os processos de interação entre halos de matéria escura acontecem mesmo após a presença dessas estruturas bariônicas. Conseqüentemente, esses objetos centrais também experimentam eventos de colisão que modificam suas estruturas internas.

A progressão desses eventos e o produto final gerado dependem de parâmetros internos dos objetos envolvidos. Observacionalmente, podemos identificar pares de galáxias a partir das assinaturas de interações. Durante o processo de interação, a força da gravidade governa todo os acontecimentos subsequentes, sendo capaz de gerar estruturas como as *tidal tails*, ou caudas mareais, que serão estudadas nos capítulos seguintes.

Neste capítulo, iremos realizar uma breve discussão a respeito de interações entre galáxias, abordando os diversos aspectos associados a esse evento e sua importância do estudo

traçado por este projeto. Baseamos nossa discussão no livro *Galaxy Formation and Evolution* (Mo et al. (2010)) e em artigos referentes ao tópico. Observe que a debate será exposto focando-se na problemática envolvendo a matéria bariônica. Uma descrição sobre o modelo hierárquico e seu importante papel na formação de estruturas será realizado no capítulo 4.

2.1 Fusões

Uma interação é caracterizada por mudanças estruturais e nas propriedades de uma galáxia devido à força gravitacional exercida por uma companheira suficientemente próxima. O grau de proximidade, a massa e os movimentos orbitais de cada objeto são exemplos de parâmetros que influenciarão no tipo de encontro gerado.

Uma aproximação entre duas galáxias não irá necessariamente resultar em uma colisão e por conseguinte fusão. Esses casos serão estudados na seção 2.2. Mas, em certas condições, o encontro pode produzir como remanescente uma única galáxia com diferentes morfologia e propriedades internas. Podemos classificar em dois tipos de encontro segundo as massas relativas dos objetos.

2.1.1 Fusão *major*

Uma fusão *major* caracteriza-se como uma fusão entre galáxias cuja razão de massa é menor ou aproximadamente igual a 3 : 1. O encontro entre objetos de massas comparáveis gera uma redistribuição espacial de suas componentes e atuação de torques devido a forças de maré causando assinaturas de colisão. A alta complexidade envolvida nesse processo exige que seu estudo seja liderado pelo uso de simulações numéricas. A figura 2.1 * apresenta uma composição de estágios de uma fusão principal em diferentes galáxias a fim de representar a evolução desse evento.

Condições para uma fusão

A força gravitacional relaciona-se com a distância pela relação $\vec{F}_{grav} \propto r^{-\frac{1}{2}}$. Consideremos uma estrela sob o poço potencial de sua galáxia hospedeira. O campo gravitacional agirá sobre cada partícula constituinte da estrela com uma determinada intensidade. Como a variação de distância entre as partículas é muito pequena, cada uma sofrerá uma intensidade de força gravitacional aproximadamente igual. No caso de sistemas de grandes dimensões, cada partícula sofrerá uma intensidade de força diferenciada. Para galáxias em interação, a distância entre suas componentes é expressiva, portanto, a força apresentará grandes variações de módulo para cada estrela ou nuvem de gás. Esse efeito diferencial de força é denominado força de maré.

Binney and Tremaine (1987) discutem os critérios que possibilitam uma interação entre galáxias resultar em uma fusão. Dois objetos suficientemente próximos experimentam efeitos

*NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University), K. Noll (STScI), and J. Westphal (Caltech)

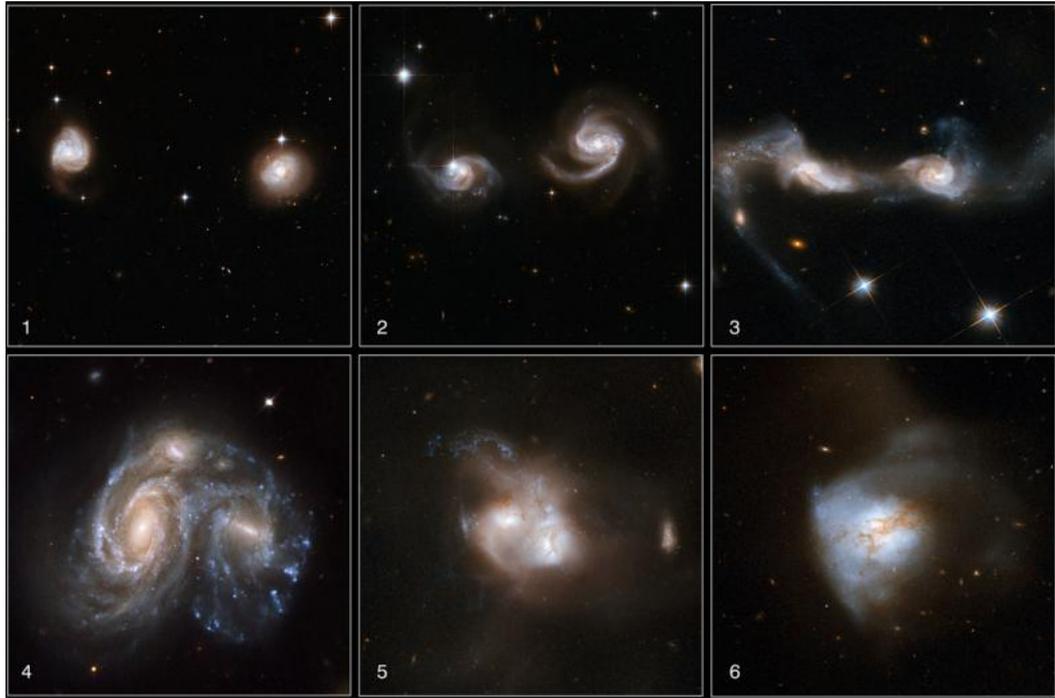


Figure 2.1: Composição de diferentes estágios de evolução de uma fusão a partir de imagens do *Hubble*

relacionados à fricção dinâmica (seção 2.2.1) e a forças mareais devido à galáxia companheira. Nesse processo, a energia orbital das galáxias é transformada em energia interna levando a um decaimento de órbita em direção ao poço do potencial da companheira. Porém, é necessário observar que a condições iniciais relativas a energia das galáxias são fatores que determinam a ocorrência de uma fusão.

Um encontro pode ser completamente definido pela energia orbital e momento angular de cada galáxia. Consideremos duas galáxias idênticas, não-rotacionais e esféricas com mesma massa M . Para análise dos parâmetros que definem a interação, inicialmente definimos o teorema do virial (Clausius (1870)). Um sistema estável, auto-gravitante e com distribuição esférica composta de N partículas, possui a seguinte relação entre a energia cinética total K e a energia potencial gravitacional total U :

$$2K + U = 0 \quad (2.1)$$

Pelo teorema do virial, podemos realizar uma aproximação para a velocidade quadrática média:

$$\langle v^2 \rangle = a \frac{GM}{r_{med}} \quad (2.2)$$

Sendo G a constante gravitacional, r_{med} o raio médio de cada galáxia e a um parâmetro unitário que depende da distribuição de densidade da galáxia. Temos como E_{orb} a energia orbital cinética por unidade de massa e L_{orb} o momento angular por unidade de massa. Analisemos os seguintes parâmetro adimensionais derivados da energia orbital e momento angular por unidade de massa.

$$\hat{E} = \frac{E_{orb}}{\frac{1}{2} \langle v^2 \rangle} \quad (2.3)$$

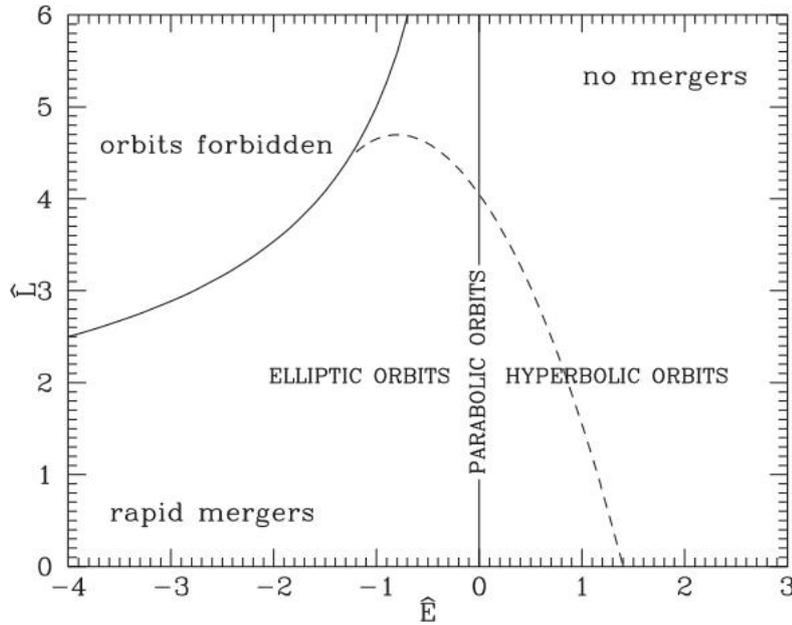


Figure 2.2: Relação entre a energia orbital e momento angular como critério para a fusão de galáxias. Órbitas acima da linha sólida são proibidas. Órbitas com energia orbital e momento angular maior que a linha tracejada geram fusões com tempo maior do que o tempo de *Hubble*. Quanto menor o momento angular e a energia orbital, menor é o tempo para a fusão se finalizar. Crédito : Mo, van der Bosch & White (2010).

$$\hat{L} = \frac{L_{orb}}{\langle v^2 \rangle^{\frac{1}{2}} r_{med}} \quad (2.4)$$

A figura 2.2 expressa a relação entre a energia e momento implicando nas possíveis situações de encontro. A linha sólida em $\hat{E} = 0$ identifica órbitas parabólicas, que dividem órbitas ligadas e não ligadas. Na região superior esquerda, a curva sólida representa o momento angular máximo possível para uma determinada energia orbital E_{orb} . Pontos acima desta linha identificam órbitas proibidas. Órbitas não ligadas são identificadas como hipérbolas e possuem $\hat{E} > 0$. Órbitas com energia orbital $\hat{E} < 0$ são caracterizadas como órbitas elípticas, com o caso circular para o momento angular máximo.

O destino de galáxias em órbitas fechadas é a fusão, porém, caso o momento angular e a energia orbital sejam suficientemente altas, a fusão ocorrerá em um tempo maior do que o tempo de *Hubble*. Portanto, quanto menor os valores desses parâmetros, em menor tempo ocorrerá a fusão. Em órbitas abertas, também é possível ocorrer fusões caso o momento angular inicial não seja elevado. Na figura 2.2, a separação entre fusões maiores e menores do que o tempo de Hubble é especificada pela linha tracejada.

Pela figura, concluímos que fusões são esperadas de serem eficientes para $\hat{E} \lesssim 1$. Considerando as galáxias movendo-se em um sistema com dispersão de velocidade σ , podemos dizer que a energia orbital por unidade de massa é aproximadamente $E_{orb} \sim \frac{1}{2}\sigma^2$, pela equação 2.3, temos que:

$$\sigma^2 \lesssim \langle v^2 \rangle \quad (2.5)$$

Ou seja, concluímos que, para que um encontro entre galáxias resulte em uma fusão, a

velocidade orbital deve ser menor ou comparável a velocidade das componentes de ambas as galáxias dentro do aglomerado ou grupo que pertença.

Remanescentes

O processo de interação retira as galáxias de seu estado virializado e após sofrer um processo de relaxação violenta, o objeto remanescente possui características distintas das galáxias progenitoras. Mo, van den Bosch & White (2010) analisam, baseado em simulações numéricas de alta resolução, os principais parâmetros que influenciarão no produto final gerado pela interação, como discutido abaixo.

Classificamos as fusões de acordo com a razão de massa entre os objetos. Consideramos a razão de massas como a divisão cujo denominador representa a menor massa. Valores de razão baixos significam que as galáxias possuem massas comparáveis e as componentes desses objetos sofrerão intensidades de forças mareais que modificarão espacialmente a distribuição interna de cada galáxia. Entretanto, para altos valores da razão de massas, o objeto de maior massa irá exercer um campo gravitacional muito mais intenso do que o objeto de menor massa resultando em uma acreção da galáxia satélite (galáxia de menor massa) pela sua galáxia hospedeira.

A morfologia dos objetos envolvidos também possui grande influência no processo. Galáxias espirais apresentam padrões espaciais de componentes estelares e gasosos. Durante uma interação, suas estruturas de braços são relativamente fáceis de serem rompidas ao interagirem com uma galáxia de massa comparável. No caso de uma fusão com uma galáxia satélite, o disco sobrevive ao evento e acreta a seu meio o material da galáxia de menor massa, tornando o disco espesso.

O gás não possui uma resposta semelhante aos componentes estelares sob a ação de uma força de maré. Galáxias ricas em gás reagem de maneira distinta a colisão em relação a galáxias pobres em material gasoso. Quando as galáxias envolvidas possuem uma fração de gás elevada, os processos dissipativos atribuídos ao gás propiciarão seu deslocamento para as regiões centrais da remanescente, gerando condensação e consequente formação estelar. Além disso, se é observado uma elevação da atividade nuclear caso as galáxias possuam buracos negros supermassivos.

A morfologia de uma galáxia também pode ser fruto de uma fusão. A figura 3.1, no próximo capítulo, mostra-nos a primeira classificação realizada por Edwin Hubble de galáxias conhecida como “Diagrama de diapasão”. As galáxias eram divididas em dois grupos principais. As galáxias *early-type* eram formadas pelas galáxias elípticas, que apresentam uma alta dispersão de velocidade e são compostas de estrelas de população antiga. As galáxias **late-type**, conhecidas como galáxias espirais, são compostas de estrelas e regiões de formação estelar recente. Por décadas, acreditou-se no paradigma de que as galáxias elípticas evoluíam para as galáxias *late-early*. Porém, a partir dos anos 80, uma série de simulações foram desenvolvidas levando a conclusão de que colisões entre galáxias de massas semelhantes circundadas por um halo de matéria escura se transformavam em galáxias elípticas. Porém, como discutido, galáxias que possuem uma fração elevada de gás disponível terão em seus interiores uma movimentação de gás que propiciará surtos de formação estelar. Portanto, concluímos que essa formação de galáxias elípticas ocorreram no Universo jovem.

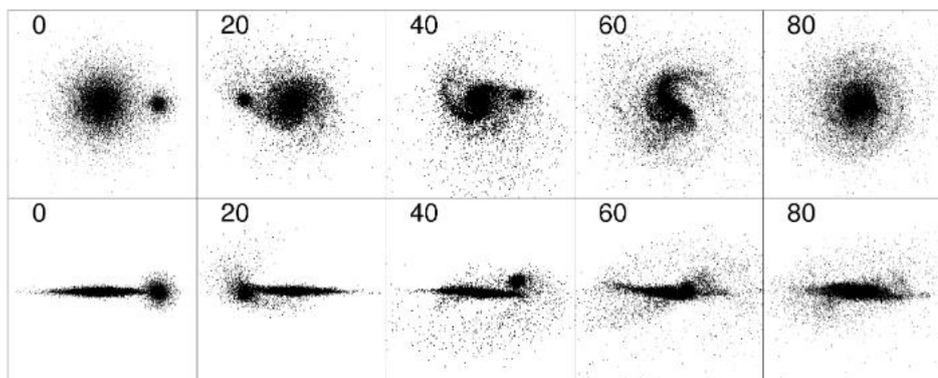


Figure 2.3: Hernquist & Mihos, 1995 simularam um evento de acreção de galáxia satélite para razão 10 : 1. A sequência superior ilustra a interação vista frontalmente e a sequência inferior ilustra o mesmo processo porém com visão de perfil. Devido a elevada densidade, a parte nuclear da galáxia satélite sobrevive ao processo de rompimento. As partes mais externas são retiradas e acretadas ao interior da galáxia espiral. Nota-se que o disco galáctico é perturbado mas ao fim do processo ele não perde completamente suas características.

2.1.2 Fusões *minor*

Um *minor merger*, caracteriza-se como o evento de acreção entre galáxias cuja razão de massa é superior a 3 : 1. Como a massa entre os objetos é destoante, o campo gravitacional da galáxia de maior massa irá dominar o processo de forma que o resultado final é a acreção da galáxia satélite no meio pertencente a galáxia hospedeira.

A função de luminosidade de galáxias, definida como a densidade numérica de galáxias em um determinado intervalo de luminosidade, mostra-nos que a quantidade de galáxias cresce ao passo que se aproxima do regime de fracas luminosidades (veremos com maior detalhe no capítulo 3). Logo, podemos concluir que a abundância de objetos de baixa massa leva a maior frequência deste tipo de interação comparada aos demais. Outro fator que favorece essa conclusão é o fato das simulações de formação de estruturas no Universo, sob domínio da cosmologia vigente, predizerem que uma grande quantidade de subhalos são formados no interior dos grandes halos de matéria escura. Esses subhalos dão origem a galáxias anãs que progressivamente interagem com sua galáxia principal (Moore et al. (1999); Klypin et al. (1999)).

A figura 2.3 demonstra o processo de captura de uma galáxia satélite por uma galáxia cuja massa é 10 vezes maior (Hernquist & Mihos, 1995). A sequência superior ilustra etapas do processo com visualização frontal e a sequência inferior ilustra as mesmas etapas com visualização de perfil. O campo gravitacional da galáxia de maior massa irá perturbar o material da galáxia anã e gradativamente retirará de seu interior gás e estrelas. Esse material se espalhará ao longo do caminho de órbita do satélite e posteriormente poderá ser incorporado ao halo bariônico da galáxia principal.

A simulação representada na figura 2.3 não torna esse processo tão evidente pois, apesar da razão entre as massas ser elevada, a densidade da galáxia anã é suficientemente alta para que sua estrutura não seja totalmente destruída antes de se anexar ao material da galáxia hospedeira. Porém, ela irá alterar drasticamente as propriedades da composição de ambas as galáxias.

À medida que a galáxia anã adentra a estrutura interna da galáxia hospedeira, ela causa

diversos efeitos em diferentes componentes da galáxia. As estrelas são espalhadas de suas órbitas, aquecendo cinematicamente o meio (Tóth & Ostriker, 1992). O gás interestelar é comprimido e frações substanciais fluem em direção ao núcleo gerando uma alta formação estelar. Além disso, podem ser produzidos ou destruídos braços espirais e, por resposta ressonante, favorecer o surgimento de barras (Newberg et al. (2002); Jurić et al. (2008)). Finalmente, a adição de novos materiais podem aumentar a espessura do disco (Abadi et al. (2003); Peñarrubia et al. (2006)).

2.2 Outras formas de interação

Como visto em 2.1.1, certas condições são necessárias para que ocorra uma fusão entre galáxias perturbadas. Para que um encontro próximo resulte em uma fusão, a velocidade orbital deve ser menor ou comparável à velocidade interna das componentes das galáxias. Em aglomerados de galáxias, observamos dispersões de velocidade da ordem de $\sim 1000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (Girardi et al. (1993)). Como a dispersão interna de uma galáxia encontra-se na ordem de dezenas a centenas (Bahcall and Casertano (1984)), não observamos fusões de galáxias em ambientes de aglomerados, a não ser em regiões centrais (Rood (1965)). Descrevamos alguns desses processos que podem ocorrer em aglomerados:

2.2.1 Fricção Dinâmica

A fricção dinâmica pode ser classificada por uma interação não-colisional, ou seja, quando não há uma colisão física entre os objetos. Uma galáxia, movendo-se em um meio embebido por materiais cujas massas são muito menores do que sua própria massa, não deveria sofrer nenhum tipo de oposição de movimento. Porém, durante a passagem pelo meio, a galáxia cede parte de sua energia e momento para os objetos ao redor, resultando em uma movimentação desses para o caminho anteriormente percorrido pela galáxia. Esse fenômeno pode ser observado na figura 2.4[†].

Pela concentração de objetos, surgirá uma força líquida em direção contrária ao movimento. Logo, pela transferência de energia para esses objetos e pela atuação dessa força gravitacional oposta ao movimento, a velocidade da galáxia se reduzirá. Chandrasekhar (1943) deduziu a variação da velocidade da galáxia pela seguinte equação:

$$\frac{d\vec{v}_M}{dt} = -16 \pi^2 \ln(\Lambda) G^2 m (M + m) \int_0^{v_M} f(v_m) v_m^2 dv_m \frac{\vec{v}_M}{v_M^3} \quad (2.6)$$

Sendo G a constante gravitacional, M a massa da galáxia a qual sofre a fricção, m a massa de cada componente pertencente a distribuição, v_M a velocidade da galáxia, $\ln(\Lambda)$ o logaritmo de Coulomb e $f(v_m)$ a densidade numérica do campo como por exemplo a distribuição de *Maxwell* no caso de distribuição uniforme.

[†]<http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/introcosm/Glossario/FriccaoDin.html>

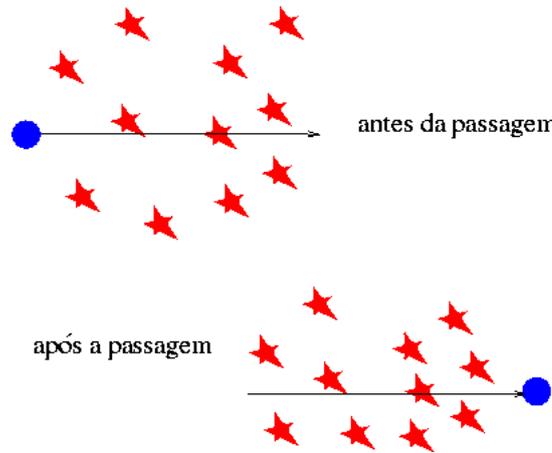


Figure 2.4: Mesmo que uma galáxia não colida com os objetos a sua volta, pode ocorrer uma transferência de energia de forma que esses objetos sejam atraídos para o caminho anteriormente percorrido pela galáxia. A concentração de objetos pode gerar uma componente de oposição ao movimento da galáxia, realizando uma desaceleração de sua velocidade orbital

2.2.2 Encontros em altas velocidades e Assédio galáctico

Quando o encontro ocorre no regime de altas velocidades orbitais, os componentes de ambas as galáxias não possuem tempo para responder à força exercida pela galáxia companheira. Não observamos uma fricção dinâmica pois não ocorre uma sobredensidade de material gerando uma oposição ao movimento.

Carrol & Ostlie (2007) discutem a resposta de uma galáxia após um evento de encontro rápido. Inicialmente, se uma galáxia encontra-se em equilíbrio dinâmico, o teorema do virial é válido. Sendo K_i a energia cinética interna inicial, U_i a energia potencial gravitacional e E_i a energia total da galáxia $E_i = U_i + K_i$:

$$K_i = -\frac{1}{2}U_i = -E_i \quad (2.7)$$

Pela natureza do encontro, as estrelas não sofreram grandes variações em suas posições, portanto, a energia gravitacional potencial permanece aproximadamente constante. Porém, o trabalho gravitacional de uma galáxia sobre a outra aumenta a energia cinética interna às custas da energia cinética total relativa ao movimento orbital da galáxia. Portanto, a energia cinética interna de uma galáxia ganhará um acréscimo:

$$K_{f,D} = K_i + \Delta K \quad (2.8)$$

O corpo não encontra-se em equilíbrio virial com o término da interação. Como a energia gravitacional permanece constante, verificamos que a energia mecânica total se transforma em:

$$E_f = E_i + \Delta K \quad (2.9)$$

Quando equilíbrio é reestabelecido, inferimos que:

$$K_f = -E_f = -E_i - \Delta K = K_i - \Delta K \quad (2.10)$$

Como a energia cinética interna quando o sistema estava em desequilíbrio é $K_{f,D} = K_i + \Delta K$, então, a energia cinética interna após retornar ao equilíbrio decresce por um fator $2\Delta K$. Essa energia cinética interna pode ser convertida em energia potencial gravitacional. Consequentemente, o sistema se expande à medida de que suas componentes afastam-se entre si. Outro tipo de perda de energia cinética pode ser verificada na ejeção de material estelar e gasoso para o meio intergaláctico.

Aglomerados de galáxias são ambientes nos quais observamos esse fenômeno devido a elevada dispersão de velocidade das galáxias componentes do sistema. Ao longo de sua evolução, uma galáxia nesse ambiente passa por frequentes eventos de encontros rápidos o que recebe a denominação de *Assédio*. Como consequência, os discos podem ser destruídos pelo aquecimento da componente a transformando em uma componente esferoidal (Moore et al. (1996); Moore et al. (1998)).

2.2.3 Pressão de arrasto e estrangulamento

O meio intra-aglomerado é embebido de gás quente de baixa densidade (Fabian, 1994). À medida que uma galáxia se aproxima das regiões centrais, esse gás age como ventos atingindo velocidades similares as velocidades orbitais das galáxias. Como consequência, o gás interestelar experimenta uma pressão de arrasto. Gunn & Gott (1972) descreveram formalmente o processo e propuseram um critério para ação da pressão de arrasto P_{ram} pelo gás intra-aglomerado.

$$P_{ram} = \rho_{ICM} v_{rel}^2 > 2\pi G \sigma_{star}(r) \sigma_{gas}(r) \quad (2.11)$$

Sendo ρ_{ICM} a densidade do gás do meio intra-aglomerado, v_{rel} a velocidade relativa entre o gás pertencente à galáxia e o gás do aglomerado, G a constante gravitacional, $\sigma_{star}(r)$ a densidade superficial de estrelas da galáxia e $\sigma_{gas}(r)$ a densidade de massa superficial do gás da galáxia.

Como consequência, o gás localizado nas regiões mais externas da galáxia interagem com o meio intra-aglomerado sendo retirado. Também se observa que o gás interno pode ser comprimido e propiciar um evento de formação estelar. A retirada de gás em galáxias espirais reduz o seu potencial para futuras formações estelares. Portanto, a retirada por pressão de arrasto explica porque aglomerados de galáxias mostram uma deficiência de gás e formação estelar em suas componentes. A subsequente perda de combustível para formação de estrelas até uma supressão dos surtos é denominado processo de *Estrangulamento*.

Em suma, descrevemos os tipos de interações que observamos entre galáxias no Universo e respectivas consequências sobre as distribuições internas dos sistemas participantes. Em fusões, a massa é um dos principais fatores que governam os eventos subsequentes de uma interação. Quando existe uma elevada razão de massa entre as galáxias, geralmente em fator maior que 3, a galáxia de maior massa irá exercer um campo gravitacional tal que o sistema de menor massa em poucas órbitas irá se destruir e ser canibalizado.

Em casos de massas comparáveis, a estrutura de ambos os objetos será alterada. Simulações numéricas demonstram que galáxias espirais interagem de forma a se transformarem morfológicamente em galáxias elípticas.

Porém, esses tipos de interações só serão possíveis acontecer caso a velocidade própria da galáxia seja comparável à velocidade de cada um dos objetos. Discutimos os tipos de interações, recorrentes principalmente em aglomerados de galáxias, onde uma fusão não é o resultado final. Neste projeto, desejamos estudar o ambiente de galáxias em fusão, portanto, a discussão realizada neste capítulo se fez necessária.

Chapter 3

Galáxias anãs

Neste capítulo abordaremos as principais propriedades relacionadas a galáxias anãs e sua importância no contexto cosmológico e no deste trabalho.

Brevemente, comentamos no capítulo anterior sobre o primeiro método de classificação de galáxias, desenvolvido através de observações por Edwin Hubble. No início do século anterior, Hubble (1926) propôs a primeira classificação morfológica de galáxias, conhecida como “Diagrama de Diapasão”. As classificações eram compostas por duas categoriais de galáxias principais, e cada uma apresentava ramificações devido a características específicas. Na figura 3.1* observamos uma representação do diagrama.

O diagrama representa uma sequência de complexidade estrutural. Apesar de ser difundida a ideia de que Hubble acreditava que havia uma sequência evolutiva das elípticas para espirais, o autor já havia abandonado a ideia em 1926.

À esquerda do diagrama encontram-se as galáxias *early-type*, ou elípticas. Sua nomenclatura é composta da letra E seguida de um valor entre 0 e 7 que definem o grau de achatamento da galáxia. Na extrema direita, encontramos objetos denominados galáxias *late-type*, ou espirais, cuja característica morfológica é a estruturação em disco contendo braços espirais. São subdivididas em duas características baseadas na ausência ou presença de uma barra central. Para os casos não barrados, subclassificamos em SBa, SBb, SBc, sendo a, b e c referentes a proeminência dos braços.

Observamos na transição entre os dois grupos um objeto de características transitórias, com formato de disco mas com pronunciado bojo central. Esses objetos são classificados como S0, ou popularmente, galáxias lenticulares. Outro tipo de galáxia, as irregulares, foram acrescentadas posteriormente ao diagrama. Caracterizam-se como nenhuma forma definida.

Embora o Diagrama de Hubble consiga sintetizar a maior parte dos objetos extragalácticos, sendo por esse motivo utilizado até hoje como base classificatória, Hubble não levou em consideração a presença de galáxias anãs. John Herschel em 1851 já havia relatado a presença de estruturas difusas ao observar a região onde se localiza a Grande Nuvem de Magalhães. Porém, apesar de não conter uma grande fração de estrelas em comparação a

*https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_sequence/media/File:HubbleTuningFork.jpg

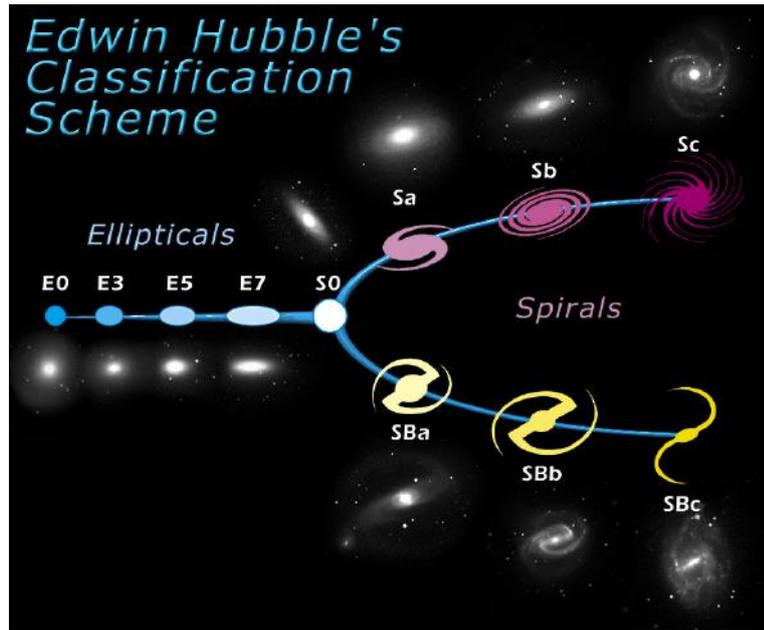


Figure 3.1: Diagrama de Hubble. Classificação de objetos a partir de análise de morfologia. Galáxias à esquerda apresentam altas dispersões de velocidades internas e populações estelares antigas. Galáxias à direita representam galáxias compostas de regiões de formação estelar recente. Galáxias irregulares apresentam morfologia sem padrão e fortes formações estelares

galáxias massivas, estima-se que as galáxias anãs são os tipos de galáxias mais abundantes no Universo.

A fim de conhecer o principal objeto de estudo de nosso projeto, neste capítulo discutiremos sobre sua importância e propriedades gerais. Nos baseamos principalmente no livro *Galaxy Formation and Evolution* (Mo et al. (2010)) e no material produzido para a Escola de Inverno do Observatório Nacional *The Evolution of Dwarf Galaxies* (Skillman (2005)).

3.1 Importância

A função de luminosidade de galáxias define-se como a densidade numérica de galáxias que possuem uma luminosidade L dentro de um intervalo de luminosidades específico. Por conseguinte, obter uma forma global dessa função nos possibilita tomar conhecimento da proporção de diferentes objetos no Universo. Uma boa aproximação para estudo de abundâncias é a função de luminosidade de *Schechter* (Schechter (1976)) representada na equação 3.1, sendo L^* a luminosidade na qual o número de objetos decai exponencialmente, α a inclinação da função de luminosidade para $L < L^*$ e Φ^* a normalização da função:

$$\Phi(L) = \left(\frac{\Phi^*}{L^*}\right) \left(\frac{L}{L^*}\right)^\alpha e^{-\frac{L}{L^*}} \quad (3.1)$$

A figura 3.2 obtida por Marzke and da Costa (1997), representa a função de luminosidade global para o Universo recente ($z \lesssim 0.05$) segundo uma amostra de 1513 galáxias do levantamento *Southern-Sky Redshift Survey*. Apesar do ajuste para regiões de baixa luminosidade apresentarem um alto grau de incerteza, é possível concluir, sem prejuízo de informações,

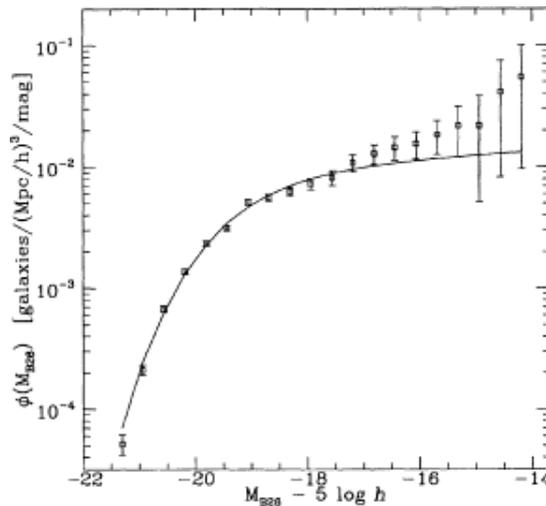


Figure 3.2: Função de luminosidade para o Universo Local, sendo $z \lesssim 0.05$. Para altas luminosidades, temos um bom ajuste da função de luminosidade de *Schechter*. Apesar de que o ajuste não esteja ideal para as regiões de baixa luminosidade, podemos inferir que existe uma fração maior de objetos compostos por baixa massa do que objetos de maior massa.

que o Universo atual possui uma maior abundância de objetos com baixas luminosidades, portanto de galáxias anãs. Como visto no capítulo anterior, essa conclusão nos permite inferir que a maior parte das fusões são por acreção de satélites. Ellis et al. (1997) demonstra que no passado as galáxias anãs eram mais numerosas, o que corrobora com a proposta do modelo hierárquico de formação de estrutura.

No capítulo à seguir, será visto com maior detalhamento o modelo de formação hierárquica de estruturas no Universo. Esta hipótese estabelece que a formação e evolução de galáxias ocorre via fusões de estruturas menores resultando em estruturas de maiores escalas. Além disso, as simulações de evolução do Universo, sob moldes do modelo atual cosmológico Λ CDM, preveem que as galáxias anãs são formadas do colapso de regiões no halo de matéria escura de uma galáxia massiva. Portanto, as galáxias anãs populam as vizinhanças de galáxias espirais e se destinam a serem acretadas pelas suas galáxias hospedeiras alterando as propriedades iniciais desse objeto.

3.2 Definição e Classificações

Não existe uma definição consensual e concisa sobre as características que identificam univocamente uma galáxia anã. Por razões históricas, consideramos que galáxias anãs são as galáxias que possuem magnitude absoluta na banda B no intervalo $M_B \gtrsim -18$ (Sandage and Binggeli (1984)). A não conformidade de caracterização também se manifesta na determinação de diferentes classes de galáxias anãs. Seguiremos as classificações apresentadas por Mo et al. (2010) e discutiremos os pontos que geram ambiguidade de classificações.

Podemos dividir as galáxias anãs em dois grupos: objetos com pouco ou quase nenhum gás compostos de estrelas antigas e objetos com conteúdo gasoso contendo regiões de formação estelar. A figura 3.3 representa uma relação entre a magnitude absoluta e a extensão desses objetos, demonstrando uma possível divisão entre tipos.

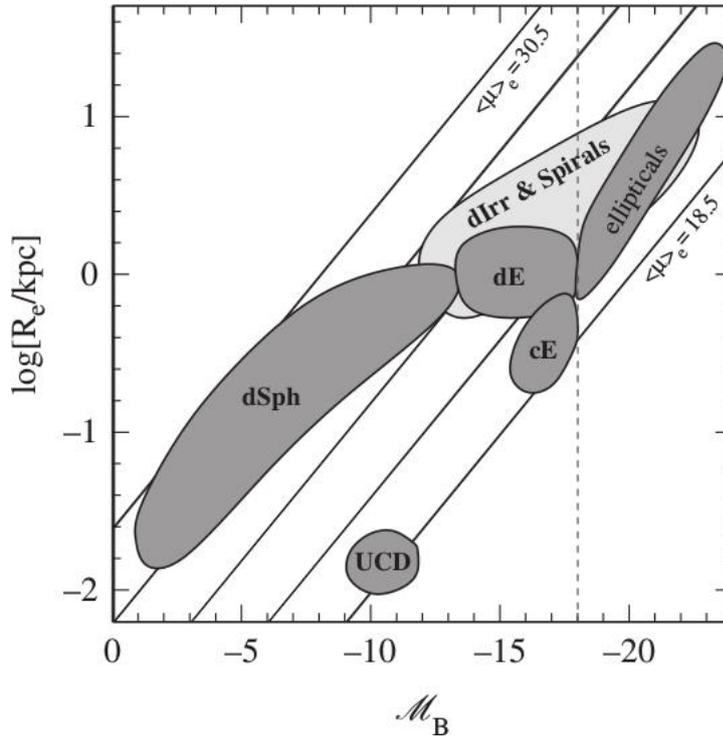


Figure 3.3: Diagrama, produzido por Mo et al. (2010), representando relações entre o raio de uma galáxia anã e sua magnitude absoluta na banda B, separando nas diferentes classificações existentes. Os objetos mais fracos são as anãs esferoidais (dSph's) e as anãs ultra compactas (UCD). Para magnitudes mais brilhante e maiores raios, encontramos as anãs irregulares. Para magnitudes semelhante porém menor tamanho, encontramos as anãs elípticas (dE's) e compactas elípticas (cE's). Para efeito de comparação são representados as localidades de galáxias espirais e elíptica massivas.

As duas principais famílias de objetos pouco gasosos são as Anãs Elípticas (dE's) e as Anãs Esferoidais (dSph's). As anãs elípticas são sistemas com pouco ou nenhum gás encontradas em aglomerados e grupos de galáxias. Devido a população estelar antiga, são mais avermelhadas em comparação as galáxias contendo formação estelar. No diagrama em 3.3, observamos que geralmente localizam-se no intervalo de magnitude absoluta $-13 \gtrsim M_B \gtrsim -18$ e possuem extensões de centenas a milhares de parsec. No diagrama observamos uma classe de anãs elípticas denominadas elípticas compactas (cE's), caracterizadas por um elevado brilho superficial comparado aos outros tipos de anãs.

As anãs esferoidais caracterizam-se como objetos fracos com baixo brilho superficial. Contém nenhum ou pouco gás apesar de serem observados alguns casos com regiões de formação estelar. Pelo diagrama, observamos que possuem extenso intervalo de magnitude absoluta e extensão, possuindo magnitude absoluta no intervalo de $M_B \gtrsim -13$, e extensão de dezenas a centenas de parsecs.

Apesar das características apresentadas, anãs elípticas, anãs esferoidais e elípticas regulares possuem propriedades similares que dificultam uma diferenciação característica. Inicialmente, a distinção entre galáxia anãs elípticas e elípticas regulares era definida pela diferença entre os perfis de brilho superficial. Para galáxias regulares, observa-se $\mu_{reg} \propto r^{\frac{1}{4}}$ (de Vaucouleurs (1948)), porém, para elípticas com $M_B > -18$, verificou-se que seus perfis de brilho se aproximam a exponenciais (Faber and Lin (1983); Binggeli et al. (1984)).

Na figura 3.4, observamos este comportamento. A magnitude $M_B = -18$ marca a tran-

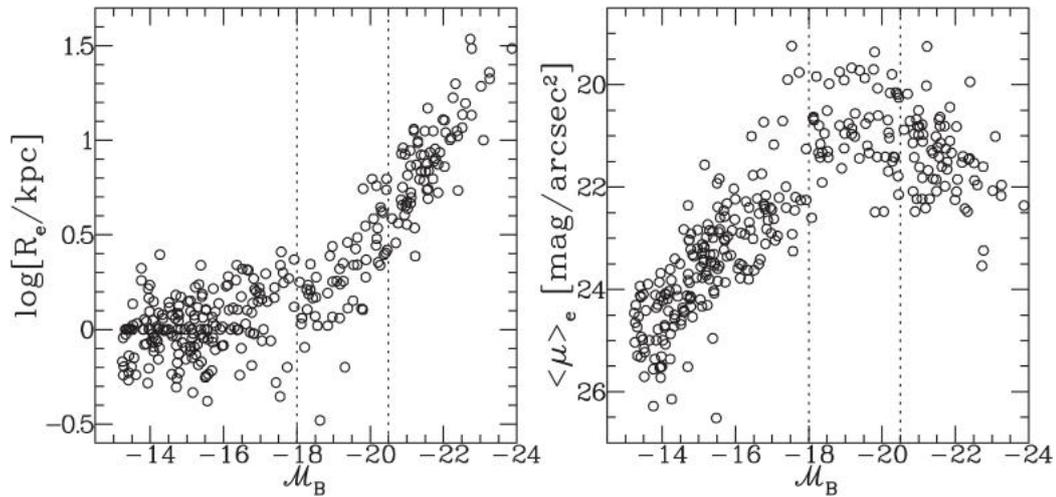


Figure 3.4: Correlação entre a magnitude absoluta e o raio efetivo para galáxias anãs (à esquerda) e correlação entre a magnitude absoluta e o brilho superficial no raio efetivo (à direita). As linhas tracejadas demarcam as magnitudes de $M_B = -18$ e $M_B = -20.5$. Crédito: Dados combinados de Graham and Guzmán (2003) e Bender et al. (1992).

sição de regimes. Elípticas brilhantes apresentam decréscimo de brilho com a luminosidade crescendo e anãs apresentam acréscimo de brilho superficial com o crescer da luminosidade. Porém, Graham and Guzmán (2003) demonstraram que esse efeito poderia ser um artefato de seleção de amostras e que caso o ajuste seja realizado com perfis de Sérsic (Sérsic (1963)), percebe-se que a transição é suave quando relacionado o índice de Sérsic e a magnitude absoluta. Com relação as galáxias anãs esferoidais, devido a semelhança em grande parte de suas propriedades, autores como Ferguson and Binggeli (1994) classificam esses objetos como apenas Elípticas Anãs.

Para as galáxias contendo gás frio e regiões de formação estelar, podemos identificar primariamente as galáxias irregulares e as galáxias HII, ou galáxias anãs azul compactas. As Anãs Irregulares caracterizam-se pela aparência amorfa. A formação estelar não é organizada em padrões porém existem exemplos de estruturas com uma certa organização espacial. A radiação emitida pela regiões de formação estelar permite que apresentem um intervalo de magnitudes absolutas mais brilhante em comparação com as outras classificações de galáxias anãs. Pela figura 3.3 concluímos que apresentam extensões de centenas a milhares de parsec.

Finalmente, embora não estejam explicitadas na figura 3.3, observamos a presença galáxias com proeminentes regiões de formação estelar, denominadas Galáxias HII ou Galáxias Anãs Compactas Azuis. São tipicamente pobres em metalicidade, com tamanho reduzido de aproximadamente $r \gtrsim 1$ kpc, e magnitude no intervalo de $M_B \geq -18$. Possuem radiação principalmente em regiões do espectro mais azuladas, indicando uma forte formação estelar (Sargent and Searle (1970)). Podem ser classificadas em tipo I e tipo II (Telles et al. (1997)). As Galáxias HII de tipo I possuem formato irregular e possuem sinais de distúrbios indica interações entre diferentes sistemas. Já as galáxias do tipo II são compactas e com estrutura regular e não demonstram sinais de produtos de interações.

Mo et al. (2010) também identificam uma categoria de galáxias anãs denominadas galáxias anãs ultra compactas (UCD's) caracterizadas por um pequena extensão, de dezenas de parsec e pequena escala de magnitude de aproximadamente, segundo o diagrama, de $-12 \leq$

$M_B \leq -9$. Representamos nas figuras 3.5 e 3.6 exemplos dos tipos citados acima.



Figure 3.5: À esquerda, encontra-se NGC 205, uma Anã ELíptica satélite de Andromeda. À direita, encontra-se a Anã Esferoidal NGC147, também galáxia satélite de Andromeda. Ambas as imagens são capturas do levantamento 2MASS



Figure 3.6: À esquerda, encontra-se uma galáxia HII denominada UGC 11411. À direita, encontra-se a galáxia anã irregular NGC 1427A. Ambas as imagens são capturas do telescópio Hubble

Chapter 4

O problema das galáxias faltantes

Como discutimos brevemente no Capítulo 2, eventos de interações ocorreram em grande frequência no passado e, portanto, possuem papel de destaque no atual modelo cosmológico de evolução do Universo.

A inclusão da matéria escura na formalização do modelo hierárquico implica em seu domínio gravitacional sobre a matéria bariônica. Esse tipo desconhecido de matéria foi e é crucial para a estruturação dos complexos cosmológicos, da forma como observamos atualmente nos grandes levantamentos.

Dentro desse contexto, encontramos explicações para o surgimento de galáxias anãs cujas propriedades foram especificadas no Capítulo 3. Esses objetos localizam-se majoritariamente ao redor de galáxias espirais massivas. No atual modelo de formação hierárquico, halos de matéria escura menos massivos podem sobreviver no interior de halos mais massivos, após serem canibalizados. O colapso dessas subestruturas deram origem às galáxias anãs.

Veremos neste capítulo que as simulações numéricas predizem uma quantidade superior de galáxias anãs em comparação com os números observados. Esse fenômeno não ocorre apenas no Grupo Local, estendendo-se aos sistemas extragalácticos. Discutiremos algumas evidências que levaram a formalização do modelo de cosmologia atual. Descreveremos as evidências da existência de matéria escura, suas propriedades e discutiremos os pontos em aberto do modelo de formação hierárquico, que possuem grande relevância no desenvolvimento deste trabalho. Baseamo-nos principalmente nosso estudo literário no livro *Extragalactic Astronomy and Cosmology, An Introduction* (Schneider (2006)), Bullock (2010) e artigos referência nos tópicos discutidos.

4.1 Evidências para matéria escura

O compreensão da evolução e estrutura do Universo se desenvolveu de maneira acelerada desde o seu início no século XX. Até então, as suposições sobre a escala do Universo eram filosóficas, sem adoção de uma abordagem científica. A primeira grande discussão sobre a escala do Universo, baseada em dados observacionais, ocorreu no ano de 1920. Conhecida como

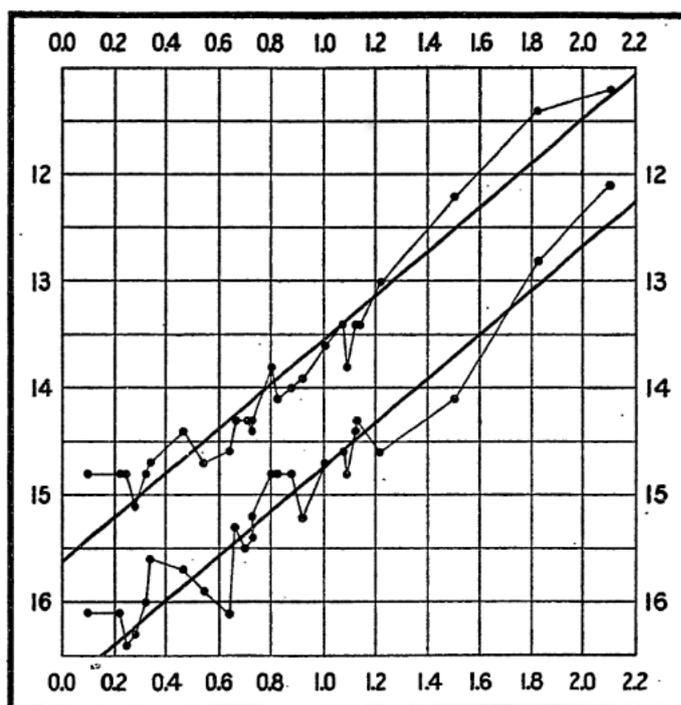


Figure 4.1: Resultado de Leavitt (1913) na análise de 25 estrelas variáveis localizadas na Nuvem de Magalhães. No eixo das abscissas encontra-se os valores para o logaritmo do período observado e no eixo das ordenadas, encontra-se os valores de magnitude aparente. Foram realizados ajustes lineares, sendo o ajuste superior referente a magnitude máxima atingida e o ajuste inferior referente a magnitude mínima atingida pela pulsação. É possível notar que o logaritmo do período e a magnitude estabelecem relação linear. Pelo fato de que os objetos estão a aproximadamente a mesma distância, essa relação traduz em uma linearidade entre o período de oscilação e a luminosidade das estrelas.

The Great Debate, ou O Grande Debate, foi protagonizada pelos astrônomos estadunidenses *Harlow Shapley* e *Heber Curtis*. Shapley, baseando-se no cálculo de distância de aglomerados globulares, via método das cefeidas, argumentava que as “nebulosas espirais” observadas eram apenas nuvens de gás interiores ao sistema composto apenas pela Galáxia (Shapley (1918)). Curtis, que nutria desconfiança sobre a acurácia do método das cefeidas, defendia que os objetos observados possuíam posições extragalácticas. Apesar de ser possível apontar erros de metodologia e análise de dados em ambos os trabalhos, o Grande Debate foi crucial para se iniciar a discussão sobre como o Universo está distribuído e como este se formou.

Leavitt and Pickering (1913), ao analisar 25 estrelas variáveis na Pequena Nuvem de Magalhães, uma galáxia anã orbitando a Galáxia, observou uma relação linear entre o período de variação de brilho e magnitude aparente máxima dos objetos, como é possível observar na figura 4.1. Supondo que todos os objetos se encontram a aproximadamente a mesma distância até a Terra, Leavitt constatou que o período de variação de uma estrela Cefeida está positivamente relacionado à luminosidade desses objetos.

Hertzsprung (1913) realizou uma calibração da relação linear encontrada por Leavitt and Pickering (1913). Utilizando o método de paralaxe, determinou a distância média de 13 cefeidas galácticas o que o permitiu calcular a magnitude absoluta média de cada objeto. Consequentemente, produziu uma correlação linear entre o período desses objetos e suas magnitudes absolutas. Uma maior precisão na calibração foi adquirida em trabalhos posteriores (Turner et al. (2010); Shapley (1918)). Portanto, o método das cefeidas consiste na

determinação das distâncias de um sistema que contenha esse tipo estelar caso seja inferido seu período de variação.

A solução do *Grande Debate* foi alcançada em meados da década de 1920 por Edwin Hubble. Hubble (1925) identificou estrelas cefeidas na galáxia de Andromeda (M31) que encontra-se a aproximadamente 785 kpc da Galáxia (McConnachie et al. (2005)). Empregando o método de cefeidas descrito acima, obteve uma distância maior do que a proposta de Shapley para extensão da Via Láctea. Surge neste ponto a necessidade e interesse do meio científico em compreender sobre como essas estruturas se desenvolveram a ponto de manifestarem-se com tal.

Em trabalho seguinte, Hubble (1929) concluiu que a galáxias presentes em sua amostra possuíam uma velocidade relativa ao observador indicando que estes objetos estavam se afastando da Galáxia, de maneira constante. Esta análise está em destaque na atual compreensão da formação e evolução do Universo, que será discutida nas seções seguintes deste capítulo

O desenvolvimento técnico-observacional subsequente permitiu, nas décadas seguintes, o surgimento de evidências observacionais de que a composição da matéria não era trivial ao que o conhecimento produzido era capaz de descrever. Munidos dos conhecimentos de dinâmica kepleriana, o estudo de diversos sistemas apresentavam exacerbada discrepância entre os métodos de cálculo de massa.

Na década de 1930, o astrofísico suíço Fritz Zwicky apresentou uma das primeiras evidências para a possibilidade de se haver mais matéria do que se é observado (Zwicky (1933)). Tendo como objeto de estudo o aglomerado de Coma, obteve a dispersão de velocidade nos espectros de um conjunto de galáxias pertencentes ao aglomerado. Conseqüentemente, dispondo da energia cinética de cada objeto, determinou a massa total do sistema pelo teorema do virial (Clausius (1870)). Esse teorema afirma que, se um sistema de partículas interagindo gravitacionalmente encontra-se em equilíbrio dinâmico, a energia cinética (K) e a energia potencial gravitacional obedecem a seguinte relação:

$$U + 2K = 0 \quad (4.1)$$

Zwicky também realizou uma estimativa do amontoado de massa inicial de cada galáxia individualmente. Assumiu que a massa luminosa das galáxias poderiam ser determinadas ao se estimar o número total de estrelas e utilizou a relação entre massa e luminosidade estelar (Kuiper (1938)):

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha} \quad (4.2)$$

Medindo o brilho e velocidade de cada galáxia individual, obteve uma estimativa da contribuição total de luminosidade do aglomerado. Conseqüentemente, como resultado notou uma discrepância entre a massa luminosa e a massa gravitacional. Zwicky notou que as estrelas visíveis contribuíam com menos de 5% da massa total do aglomerado. Concluiu em seu artigo que haveria uma matéria não detectada cuja contribuição era superior à contribuição bariônica.

Apesar de sua conclusão, foi necessário algumas décadas para que as evidências observacionais subsequentes convencessem a comunidade científica de que a matéria escura faz parte da composição do Universo. Uma forte evidência foi exposta por Rubin et al. (1978) ao analisar curvas de rotação de 60 galáxias espirais. A peculiaridade dessas galáxias está no fato de

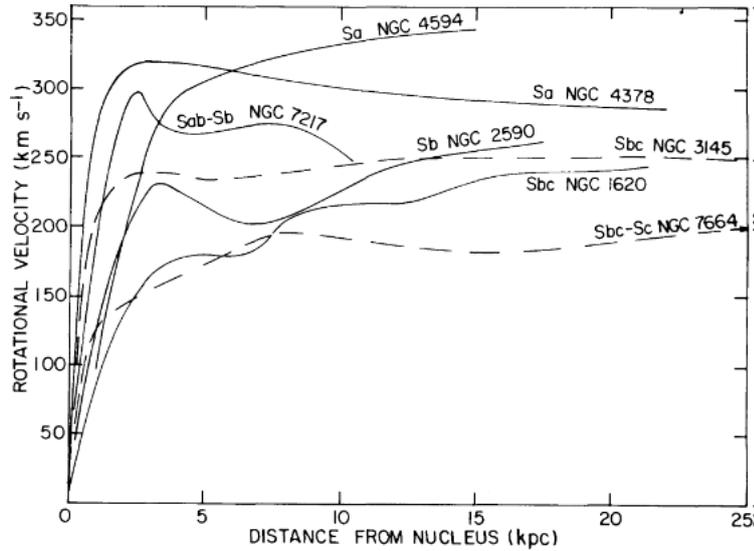


Figure 4.2: Velocidades rotacionais de 7 galáxias pertencentes a amostra de Rubin et al. (1978) com relação a distância ao núcleo. Observa-se para as menores distâncias um elevado aumento da velocidade rotacional até atingir um pico. É possível notar diversos comportamentos em diferentes galáxias. Para NGC 4594, notamos que com o fim do crescimento exponencial, a velocidade rotacional permanece crescendo com o raio de forma aproximadamente linear. No caso de NGC 4378, a velocidade a partir de 5 kpc permanece aproximadamente constante, com um leve decaimento. Segundo a dinâmica kepleriana, as velocidades rotacionais deveriam cair com a distância de forma $v \propto r^{-1}$

que estão em posição *edge-on*, ou seja, o vetor normal ao plano do disco é aproximadamente perpendicular à linha de visada. Essa disposição nos permite observar uma porção da galáxia com movimento de afastamento e a outra porção com movimento de aproximação. Para obter as velocidades rotacionais de diversos pontos de cada galáxia, foi-se utilizado nuvens de gás ricas em hidrogênio e hélio que circundam estrelas quentes. Estas nuvens, conhecidas como regiões de HII, são fortemente ionizadas e emitem radiação $H\alpha$ permitindo identificar por desvio Doppler de velocidades relativas.

Era esperado que as velocidades rotacionais estivessem de acordo com a dinâmica kepleriana. Sendo G a constante gravitacional universal, m a massa em um determinado raio r , a velocidade orbital pode ser estabelecida por:

$$v(r) = \left(G \frac{m(r)}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

Porém como é observado na figura 4.2, a partir de um determinado raio, as velocidades rotacionais identificadas tendem a aumentar com a distância ao núcleo galáctico até o ponto em que atingem um limite e permanecem contantes. Para que isso seja possível, a massa contida dentro de uma esfera de raio r deve crescer na mesma proporção de crescimento do raio. Esta massa não é observada a partir da luminosidade emitida.

As evidências apresentadas são alguns dos trabalhos que levaram a comunidade na década de 1980 a adotarem a matéria escura como composição de galáxias e aglomerados e que esta possuía forte influência na dinâmica de sistemas de variadas escalas de comprimento e na formação e evolução do Universo (Press & Schechter (1974)).

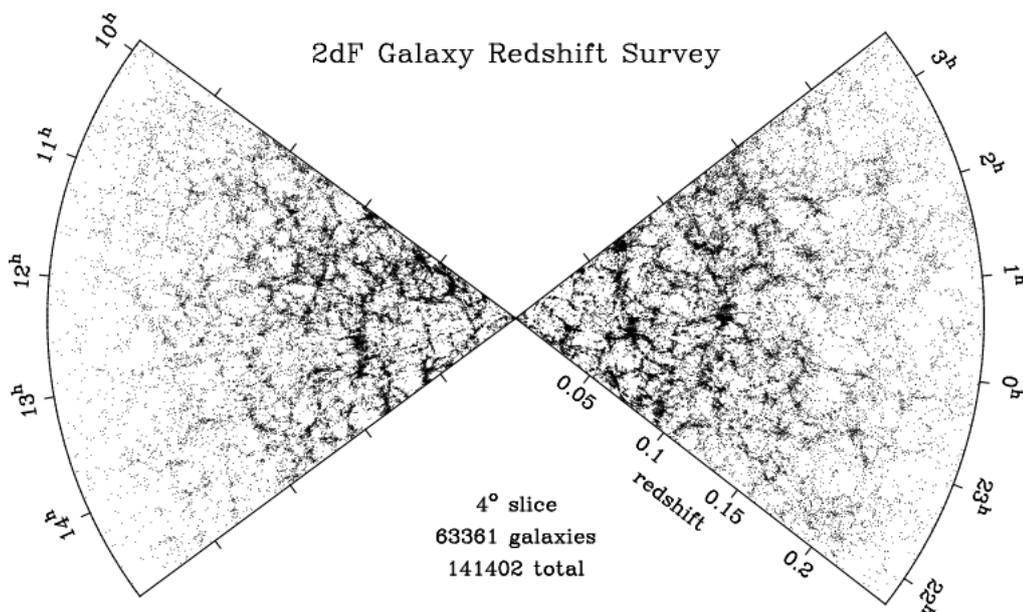


Figure 4.3: Representação espacial de um corte de quatro graus do levantamento astronômico *2dF Galaxy Redshift Survey*.

4.2 Λ CDM

O apontamento de telescópios no estudo de objetos extragalácticos nos possibilitou identificar no Universo regiões que possuem pouca ou nenhuma emissão de radiação, como o meio entre galáxias, e regiões que possuem alta concentração de matéria em um volume, como grupos e aglomerados de galáxias. Essa percepção inicialmente nos leva a acreditar que o Universo é caracterizado por um elevado grau de inhomogeneidade. Porém, com o avanço instrumental e a execução de levantamentos astronômicos profundos, não notamos esse comportamento quando tratamos de largas escalas.

A figura 4.3, nos mostra a distribuição espacial de 4° do *2dF Galaxy Redshift Survey* (Peacock et al. (2001)). Ao analisar estruturas em pequenas escalas, notamos que existem regiões de baixa e alta concentração de matéria. Porém, ao analisar na figura um corte para altas escalas de comprimento, podemos aproximar a distribuição de densidade como sendo constante. Esse fato nos leva a postular o princípio cosmológico que propõe que o Universo, em largas escalas, é homogêneo e isotrópico (Peebles, 1993). Espacialmente, observamos uma densidade de matéria aproximadamente constante, sem uma direção preferencial de formação de estruturas. Conseqüentemente, podemos considerar que a amostra de galáxias que observamos é representativa e a propriedades físicas inferidas equivalem as propriedades de todo o Universo.

Na seção anterior, discutimos algumas evidências que levaram o meio acadêmico a majoritariamente reconhecer a existência e importância da matéria escura, mesmo que ainda se saiba muito pouco sobre sua natureza. Trata-se de uma forma indetectável de matéria da qual somos capazes apenas de quantificar sua influência gravitacional sobre os meios nos quais está inserida. É fundamental na teoria de formação de estruturas cosmológicas de maneira que possui papel de destaque no atual modelo cosmológico, Λ CDM (*Lambda Cold Dark Matter*).

A matéria escura é caracterizada como “fria” pois as velocidades de suas partículas não

são relativísticas. A compreensão de sua natureza, como dito, é escassa porém supomos que seja não-bariônica. Além disso, não se mostra dissipativa pois não é capaz de se resfriar por emissão de radiação, e como sabido, suas partículas exercem apenas interações gravitacionais, portanto não são colisionais.

O parâmetro Λ representa a contribuição da energia do vácuo, também denominada energia escura, para a expansão acelerada do Universo. A expansão não está relacionada com um afastamento físico entre os objetos, mas com uma própria dilatação do espaço (Frieman et al. (2008)). A presença da energia escura gera um efeito de pressão negativa, contrária a força gravitacional acelerando a natural expansão (Perlmutter et al. (1999)). As equações de movimento são descritas pelas equações de *Friedmann-Lemaître* (Friedmann (1922)):

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (4.4)$$

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3} \quad (4.5)$$

O fato do Universo estar em expansão nos faz supor que houve um momento inicial onde toda a sua matéria está concentrada em uma única região. Sob essa perspectiva, Georges-Henri Édouard Lemaître e Alexander Friedmann teorizaram, independentemente, a teoria do *Big Bang* (Lemaître (1927)). O Universo se originou a partir de um estado de temperatura infinita em que toda a matéria e radiação estavam localizadas em um espaço infinitamente pequeno. Em um determinado momento inicial, todo o espaço iniciou uma expansão recorrente até os dias atuais, diminuindo a temperatura com o tempo.

Uma forte evidência para tal fato foi a descoberta da Radiação Cósmica de Fundo (Dicke et al. (1965)). Durante os tempos iniciais, a elevada densidade e temperatura tornavam o meio opaco para a radiação. Em um determinado momento, núcleos e elétrons formaram átomos e tornaram-se eletricamente nêutros de forma que o espaço se tornou transparente à radiação. A radiação cósmica de fundo é definida pela radiação emitida pelas últimas superfícies difusas de matéria desta época. Diversos levantamentos (Mather (1982)) foram realizados objetivando medir a intensidade dessa radiação concluindo que a temperatura média é próxima de $T \simeq 2.72$ K e que, em média, as contribuições de radiação são constantes para todo o espaço (Fixsen (2009)). Isso nos leva a concluir que, como a radiação se mostra constante para qualquer parte do Universo, esse cenário só seria possível caso partisse de uma única região e se expandisse radialmente.

4.3 Modelo hierárquico de formação de estruturas

A compreensão dos mecanismos físicos vigentes no Universo permitiram que uma série de teorias se manifestassem a fim de explicar a formação de estruturas da forma como são observadas atualmente. Apesar da radiação cósmica de fundo possuir um pequeno grau de anisotropia (Bucher (2015)), as inomogeneidades nesta idade do Universo já se manifestavam. A força gravidade é o mecanismo básico no crescimento de estruturas com o passar do tempo.

Os pontos do Universo possuíam contribuições de campo gravitacional tanto da média total de todo o espaço, quanto das flutuações de densidade.

Regiões que apresentam uma maior densidade do que a densidade média do Universo em um determinado momento, portaram um campo gravitacional mais intenso do que a média, favorecendo um aumento na sua densidade e uma desaceleração de suas partículas constituintes. Ao contrário, regiões com constraente de densidade inferior a média, portaram um campo gravitacional fraco favorecendo uma rarificação de matéria e aceleração local da expansão. A força gravitacional foi fator principal para surgimento de estruturas no Universo.

A descrição da teoria de crescimento de perturbações baseia-se na definição do parâmetro denominado contraste de densidade, definido da seguinte forma:

$$\delta(r, t) = \frac{\rho(r, t) - \rho_{med}}{\rho_{med}} \quad (4.6)$$

Sendo $\rho(r, t)$ a densidade em um determinado ponto r do Universo e ρ_{med} a densidade média de todo o Universo. A análise do crescimento de estruturas possui duas abordagens: a linear válida para o regime $\delta(r, t) \ll 1$ e a não-linear a partir do momento em que o contraste de estrutura não obedece mais a condição linear e é necessária uma aproximação via colapso esférico. Na teorias apresentadas, é necessário considerar que os efeitos da Relatividade Geral e consequentemente da curvatura do Universo são apenas válidos para escalas comparáveis ao raio de Hubble.

O crescimento linear de estrutura segue uma aproximação de fluidos cuja conservação de massa e momento são descrita respectivamente pelas equações de continuidade 4.7 e Euler 4.8. As duas equações são expressas em coordenadas comóveis que caracterizam-se como parâmetros que acompanham a expansão do Universo, de maneira que a distância física não varia com o tempo devido a expansão do espaço.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{3a}{a} \rho + \frac{1}{a} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\mathbf{u} \cdot \nabla}{a} \mathbf{u} + \frac{a}{a} \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_{mean} a} \nabla \rho - \frac{1}{a} \phi \quad (4.8)$$

Sendo \mathbf{u} a velocidade peculiar devido ao desvio da expansão homogênea, ϕ o poço gravitacional e $a(t)$ o fator de escala cósmico. Para definição do último termo, consideramos uma esfera homogênea que se expande ou se contrai radialmente. Impõe-se que a densidade permaneça espacialmente constante, porém, esta pode variar com o tempo. Considera-se um ponto em um determinado momento t cuja origem coincida com o centro da esfera. Uma partícula na esfera, localizada em uma posição \mathbf{x} em um tempo t_0 estará localizado em uma posição $r(t)$ em um determinado tempo t . Portanto, $a(t)$ é uma função do tempo que representa a expansão relativa do Universo seguindo a seguinte relação:

$$r(t) = a(t)x \quad (4.9)$$

Como $r(t_0) = x$, então $a(t_0) = 1$. Consideramos o regime de pequenos desvios do contraste de densidade, portanto, mantemos apenas termos em primeira ordem dos parâmetros \mathbf{u} e δ . Tomando $P = 0$, obtemos as equações:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{a}{a} \mathbf{u} = -\frac{1}{a} \nabla \cdot \phi \quad (4.11)$$

Combinando as duas equações a fim de eliminar a velocidade peculiar \mathbf{u} e o potencial gravitacional (com o auxílio da equação de Poisson 4.13):

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + \frac{2a}{a} \frac{\partial \delta}{\partial t} = 4\pi G \rho_{med} \delta \quad (4.12)$$

$$\partial^2 \phi = 4\pi G - \Lambda \quad (4.13)$$

Podemos resolver essa equação diferencial assumindo que a solução pode ser representada pelo produto de uma solução espacial e de uma solução temporal.

$$\delta(\mathbf{x}, t) = D(t)\delta(\mathbf{x}) \quad (4.14)$$

$\delta(\mathbf{x})$ é uma solução arbitrária de coordenadas espaciais e a solução $D(t)$ satisfaz a equação:

$$D + \frac{2a}{a} D - 4\pi G \rho_{med} D = 0 \quad (4.15)$$

Existem duas possíveis soluções, sendo uma decrescente com o tempo e a outra crescente com o tempo. Mesmo que em tempos recentes à origem do Universo o comportamento de $\delta(\mathbf{x}, t)$ fosse definido por uma composição de ambas as soluções, em tempos posteriores, a solução crescente domina tornando a solução decrescente desprezível. Portanto, a solução dessas equações diferenciais seguem o critério $|\delta| \ll 1$ e possui forma:

$$\delta = D_+(t)\delta_0 \quad (4.16)$$

Sendo $D_+(t)$ o fator de crescimento normalizado de forma que atualmente $D_+(t_0) = 1$. O fator representa uma amplificação do contraste de densidade que permanece congelado na extrapolação para o tempo atual δ_0 .

Para valores elevados de $\delta(r, t)$, a aproximação de fluidos não é mais válida e uma nova abordagem, não-linear, se faz necessária. A aproximação mais geral de crescimento de perturbações de densidade é obtida pelo modelo de colapso esférico. Considera-se as regiões de sobredensidade como esferas de raio comóvel. Como já descrito, uma região com contraste de densidade superior à densidade média do Universo terá expansão desacelerada e criará em sua vizinhança um campo gravitacional favorecendo o aumento de sua densidade.

Se a densidade é suficientemente alta, a força gravitacional associada a esse campo vencerá a expansão do Universo e a esfera atingirá um raio máximo iniciando um colapso. Se a esfera fosse homogênea e suas partículas se movimentassem em órbita circular, o colapso levaria a singularidade. Porém, existem flutuações de densidade no próprio interior da esfera. As partículas não completam o colapso pois são espalhadas pelas flutuações de densidade presentes no halo massivo. Esse processo gera uma maior inhomogeneidade dentro da esfera, realizando uma transferência de energia entre as partículas até se estabelecer um equilíbrio. O equilíbrio é atingido em um curto espaço de tempo, caracterizando uma *relaxação violenta*.

O modelo de esfera colapsante nos permite especular a respeito da densidade numérica de halos esféricos de diferentes massas no Universo em um determinado tempo. Para esta

análise, inicialmente caracterizaremos o crescimento de perturbações gravitacionais dentro de um campo de densidade gaussiano. Decompomos as flutuações de densidade em séries de *fourier* associando um vetor de onda k a cada componente da série. Cada componente terá uma contribuição de amplitude a_k . Definimos um *espectro de potências* $P(k)$ como a média dos quadrados de todas as amplitude.

$$P(k) = 2\pi \int_0^\infty dx x^2 \frac{\sin(kx)}{kx} \xi(x) \quad (4.17)$$

Sendo $\xi(x)$ a função de correlação que identifica o excesso de propabilidade de se encontrar um par de galáxias em um determinado volume do Universo. O espectro de potência é computado dentro de um volume onde o Universo é assumido como periódico.

O modelo de *Press-Schechter* (Press & Schechter (1974)) visa estimar a densidade numérica de halos de matéria escura em função da massa e *redshift*, utilizando o conceito de espectro de potências e do modelo de colapso esférico. O modelo considera um campo de flutuações de densidade $\delta_0(x)$ com flutuações em diversas escalas computadas pelo espectro de potências $P(k)$. O processo consiste de uma suavização por convolução do contraste de densidade por uma função filtro de fator de escala R comóvel. O resultado é uma função suavizada $\delta_r(x)$. Os máximos da função representam picos que, caso obedeçam uma condição $\delta_R \geq \delta_{min}$, o sistema entrará em crescimento não-linear em um raio R e eventual colapso. A estimativa desse valor de contraste mínimo pode ser encontrado para um determinado modelo cosmológico.

Portanto, a partir do modelo de *Press-Schechter*, podemos inferir uma densidade numérica comóvel $n(M, z)$, em função da massa e de *redshift*, de halos de matéria escura em equilíbrio virial. A densidade numérica depende de amplitude de flutuação de densidade δ_0 . Como veremos na figura 4.4, a densidade numérica de objetos é função decrescente da massa

Eke et al. (1996) fez uma estimativa da densidade numérica em função da massa e *redshift* para aglomerados de galáxias utilizando simulações numéricas. Foi capaz de verificar que o formalismo de Press-Schechter prediz a abundância de aglomerados de galáxias observada em função do *redshift*. Na figura 4.4 observamos os resultados. São demonstrados as densidades para três diferentes épocas, $z = 0$, $z = 0.33$ e $z = 0.5$ em diferentes cosmologias. Ω_0 é denominado parâmetro de densidade e seu valor nos diz sobre o movimento do Universo. Formalmente, é definido como:

$$\Omega_{0,i} = \frac{\rho_{0,i}(t)}{\rho_{crit}} \quad (4.18)$$

Sendo ρ_{crit} a densidade do Universo transiente entre o regime de expansão eterna e o regime de expansão seguido de um recolapso e $\rho_{0,i}(t)$ a densidade de um componente do Universo, sendo a matéria, energia escura ou radiação. O valor de ρ_{crit} , e consequentemente o valor de Ω_0 , podem ser determinados a partir das soluções das equações de *Friedmann-Lemaître*. Caso $\Omega_0 > 1$, afirmamos que o Universo é dito fechado e inicia em acelerada expansão porém atinge uma aceleração máxima e à seguir recolapsa. Caso $\Omega_{total} < 1$, o Universo é dito aberto e se expandirá aceleradamente e indefinidamente. Porém, no caso em que $\Omega_{total} = 1$, ou seja $\rho(t) = \rho_{crit}$, o Universo inicia processo de expansão acelerada, mas aceleração tende a 0 em tempo infinito de forma que a expansão permaneça em velocidade constante. Nossas medições concluem que atualmente o Universo possui um parâmetro de densidade total $\Omega_{total} \simeq 1$, possibilidade indicada na figuraa.

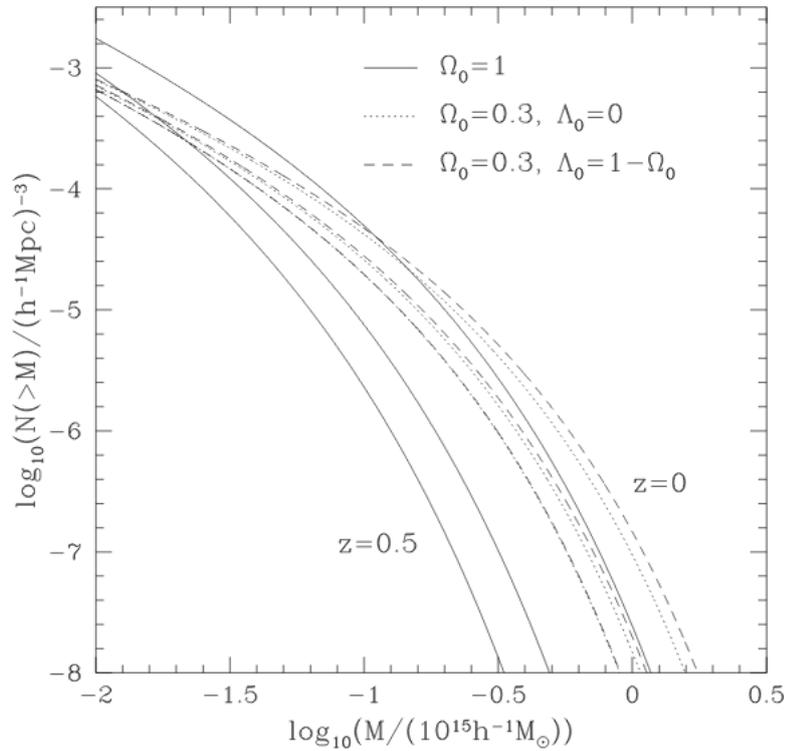


Figure 4.4: Resultado de simulações numéricas desenvolvidas por Eke et al. (1996) da densidade numérica em função da massa, para diferentes *redshifts*. No gráfico, observamos a representação de 3 cosmologias distintas. A linha sólida representa um Universo dominado pela matéria escura ($\Omega_0 = 1$), a linha pontilhada representa um Universo sem energia escura, e 30% de matéria escura. A linha tracejada representa um Universo composto de 30% de matéria escura e o restante composto de energia escura. Para cada cosmologia, é representado os resultados para $z = 0.5$, $z = 0.33$

Portanto, é possível observar que, para a fração de quantidades estabelecidos pela cosmologia vigente, que a quantidade de halos de matéria escura de baixa massa é maior em comparação à quantidade de halos de matéria escura de massas mais elevadas. Essa informação nos leva a supor que inicialmente, o colapso e virialização de estruturas de baixas massas são mais eficientes. Para o crescimento de maiores estruturas, é necessário a agregação de estruturas menores. Portanto, o espectro de potência associado ao formalismo de Press-Schechter nos leva a concluir que a formação e crescimento de estruturas no Universo é hierárquica: dominados pela matéria escura, aglomerações de matéria de baixas massas são formadas e, via fusões, crescem levando ao aumento da densidade local de alguns sistemas no Universo.

4.4 Satélites faltantes

O modelo Λ CDM obteve, ao longo das últimas décadas, sucesso em descrever uma série de incógnitas no entendimento das estruturas do Universo. Como visto na seção 4.1, a forma como as estrelas e nuvens de gás rotacionam ao redor de uma galáxia espiral e a dispersão de velocidade em aglomerados de galáxias não são possíveis de serem explicadas apenas se considerarmos a massa bariônica inferida observacionalmente. A matéria escura também é capaz

de explicar a radiação cósmica de fundo (Bucher (2015)), a floresta de Lyman- α (Weinberg et al. (2003)) e o efeito de magnificação das lentes gravitacionais associadas a aglomerados de galáxias (Walsh et al. (1979)). Além disso, o estudo da formação e estruturação do Universo é acompanhada do forte emprego de simulações numéricas a fim de investigar computacionalmente os complexos processos que aconteceram ao longo da evolução do Universo. Simulações de N-corpos em alta resolução, como as recente *Eagle* (Schaye et al. (2015)) *Illustris* (Genel et al. (2014)), são capazes de concordar com a distribuição das estruturas observacionalmente identificadas.

Entretanto, dois fenômenos são observados sem a conciliação de sua ocorrência com o modelo de matéria escura atual. O primeiro é denominado *cuspy-core problem* e refere-se a discrepância entre os perfis de densidade de matéria escura observados para galáxias de baixas massas e os perfis de densidade preditos pelas simulações numéricas de N-corpos (Peñarrubia et al. (2012)).

O segundo problema é de forte interesse deste trabalho, pois relaciona-se a abundância de galáxias anãs ao redor de galáxias principais. Com o aumento da resolução de simulações de N-corpos em meados da década de 1990, foi-se possível restringir o interesse a evolução de halos individualizados. Observa-se que durante o processo de acreção de halos de baixas massas para halos de matéria escura de alta massa, alguns desses halos de baixa massa foram capazes de permanecer com grande parte de sua estrutura ligada mesmo depois de serem acretados a halos mais massivos. Algumas simulações de alta resolução, visando quantificar o número de estruturas formadas, constataram que o número de subhalos presentes dentro dos halos de matéria escura em $z = 0$ são superiores às observações compreendidas no Grupo Local.

Moore et al. (1999) examinou numericamente as subestruturas formadas em um Universo dominado pela estruturação hierárquica. As simulações utilizadas possuíam resolução suficiente para resolver os estruturas ao redor de galáxias e aglomerados de galáxias. O modelo de Universo utilizado é dominado pela matéria escura fria e normalizado de forma a reproduzir a abundância dos aglomerados de galáxias atuais. O artigo foca-se na comparação dos parâmetros possíveis de serem extraídos tanto observacionalmente quanto computacionalmente. O parâmetro básico utilizado foi a velocidade orbital para quantificar a população de subhalos, além de ser possível de ser inferido das galáxias satélites presentes no Grupo Local. A velocidade rotacional máxima é definida da forma:

$$V_{max} = \max \left(\frac{G \cdot m(< r)}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.19)$$

Sendo a massa $m(< r)$ dentro de uma esfera de raio r . A velocidade máxima é uma medida da profundidade do potencial e pode ser obtido tanto de forma observacional quanto nos dados de saída da simulação.

Moore et al. (1999) traçou a função cumulativa relativa a velocidade rotacional das subestruturas, observado na figura 4.5. A função de massa observada em $z = 0$ é mostrada dentro do raio virial de uma galáxia e um aglomerado simulados e comparada a função relacionada ao aglomerado de Virgo, representado pelos pontos abertos. Além disso, encontra-se relacionado a distribuição cumulativa de 11 galáxias satélites observadas dentro de um raio de 300 kpc da Galáxia. Nota-se que, para o caso do aglomerado de galáxias, a simulação aproximou-se dos dados observados satisfatoriamente. Porém, no caso do modelo e das

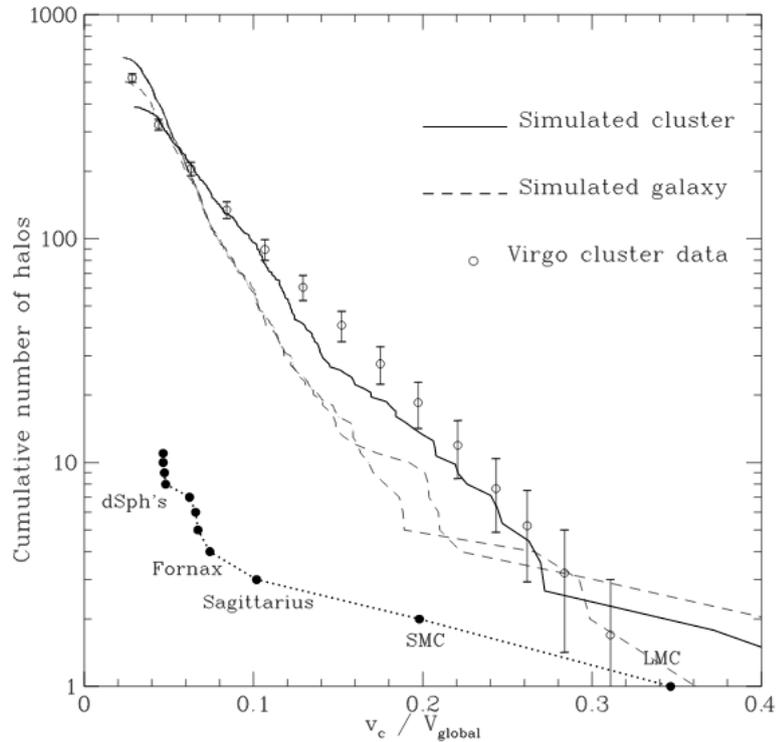


Figure 4.5: Função cumulativa de número de halos em função da velocidade rotacional máxima dentro de uma esfera de raio m . As linhas sólidas e tracejadas mais representam aglomerados e galáxias simuladas, respectivamente. Os pontos representam as velocidades para o aglomerado de Virgo e as linhas pontilhadas representam a função cumulativa para a Galáxia. É possível observar a concordância entre os dados de aglomerados observados e simulados, porém uma grande diferença para observações de galáxias anãs e simulações

observações relacionadas a uma galáxia proporcional ao tamanho da Via Láctea, encontramos uma elevada discrepância entre as densidades numéricas.

Klypin et al. (1999) realiza um estudo similar e constata um cenário semelhante ao de Moore et al. (1999). Seu estudo de abundância e distribuição de velocidades rotacionais de subhalos de matéria escura constatou que deveríamos observar uma maior número de satélites ao redor de nossa galáxia. O modelo prevê aproximadamente 300 galáxias anãs dentro de um raio de 1.5 Mpc enquanto haviam se observado apenas aproximadamente 40 satélites em todo o Grupo Local.

Portanto, podemos concluir que o problema de subestruturas caracteriza-se como a discrepância entre o número de galáxias anãs satélites prevista pelo modelo cosmológico atual Λ CDM e a contagem de galáxias observadas nas redondezas do Grupo Local e de sistemas extragalácticos. Os halos de matéria escura contidos dentro de grandes halo de matéria escura, os quais formaram as galáxias observadas, são ineficientes na condensação e formação de estruturas observáveis. Desejamos identificar os possíveis fenômenos que impedem a condensação de matéria bariônica e identificar em qual escala de massa a eficiência de formação de galáxias ocorre Bullock (2010).

Em síntese, discutimos algumas noções sobre a forma como compreendemos o Universo, desde o início de sua expansão até a atual estruturação de suas componentes.

Apesar de sua natureza ainda mal compreendida, a matéria escura se estabeleceu como componente dominante no processo de crescimento de estruturas. Inicialmente em um Universo quase homogêneo, a gravidade rearranjou a matéria de forma que se desenvolvessem regiões de sobredensidade que, com o passar do tempo, acretassem cada vez mais matéria e se opusessem localmente à expansão do Universo.

Essas regiões se amplificaram em estruturas aproximadamente esféricas denominadas halos de matéria escura contendo uma menor fração de matéria bariônica diluída. O crescimento, até então linear, permitiu em um dado momento que essas regiões colapsassem formando em suas regiões centrais galáxias massivas.

Dentro desses halos, é observado por simulações numéricas, a sobrevivência de subestruturas anteriormente acretaadas que se colapsaram em galáxias de menor massa. Entretanto, é predito uma quantidade muito maior de galáxias anãs do que se é observado no Universo Local. Apesar de possíveis soluções serem discutidas, essa questão permanece em aberto.

Chapter 5

Galáxias anãs mareais

Arp (1966) publicou o primeiro catálogo de objetos que não se enquadram nas classificações usuais apresentada por Hubble em 1926, como verificado na figura 5.1. Para alguns desses sistemas, é notável a presença de pares interagentes que possuem longas estruturas filamentosas, ora conectando as duas galáxias, denominadas pontes, ora se estendendo em direção ao meio intergaláctico, denominadas caudas. Esses filamentos irradiam alta quantidade de radiação ultravioleta, indicando uma intensa formação estelar recente.

Tentativas para a explicação dessas estruturas foram publicadas ao longo da década de 60. Zwicky (1962) propôs que o mecanismo de surgimento desses filamentos seria a expulsão de matéria via atividade de supernova intensificadas pela colisão. Porém, este cenário não era capaz de explicar a fina largura dos fios e a conexão entre galáxias (Pikel'Ner (1965)). Ambartsumian (1961) e Arp (1972) sugeriram o processo de ejeção de matéria pelo núcleo como mecanismo de formação da estrutura. Dois jatos simétricos são lançados e gradativamente desacelerados em contato com o meio intergaláctico, gerando uma região de grande densidade evoluindo para uma galáxia companheira. Este conjunto explicaria o

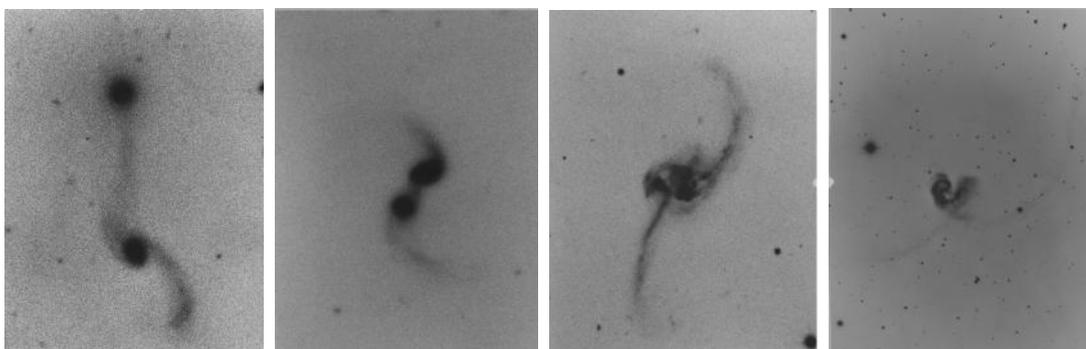


Figure 5.1: Exemplo de quatro galáxias encontradas no Atlas de Galáxias Peculiares. Da esquerda para direita: Arp 97/UGC 7085A, par em interação o qual é ligado por uma estrutura filamentososa de gás e estrelas denominada ponte; Arp 241/UGC 9425 apresenta caudas mareais no sentido oposto à interação; Arp 243/NGC 2623 é um par em estao avançado de fusão apresentando caudas mareais no sentido oposto à interação; finalmente Arp 244, popularmente conhecida como Antena, encontra-se em estágio final de fusão, com uma longa cauda mareal.

sistema de duas galáxias ligadas por uma ponte.

Porém, apenas em simulações executadas por Toomre and Toomre (1972) pode-se obter a resposta para a origem dessas estruturas. O encontro de duas galáxias espirais podem produzir forças que são capazes de gerar estruturas finas e longas como as observadas na figura 5.1.

Nas seções que se seguem serão apresentados os principais estudos que levaram a compressão da formação e propriedades das caudas mareais, e das estruturas passíveis de serem formadas, as *Tidal Dwarf Galaxies*. Baseamos nosso estudo literário majoritariamente em Duc and Renaud (2011) e Duc (2012) e consequentes referências. É importante frisar que as simulações numéricas desenvolveram papel crucial para o entendimento das estruturas estudadas.

5.1 Conceito

Não há um conceito unívoco que descreva completamente as galáxias produzidas por forças mareais, ou *Tidal Dwarf Galaxies* (Duc (2012)). *Tidal*, em português maré, refere-se ao fato de que o objeto é composto do material expelido pelas forças de maré durante uma fusão *major*. Esta definição torna-se involuntariamente ampla pois, dos detritos da interação, podem surgir estruturas como anéis e gás ejetado para o meio intergaláctico (Buta and Combes (1996)). Porém, restringimos aos objetos formados nas *caudas mareais* observadas principalmente em colisões entre galáxias espirais em geometria favorável.

Consideramos como galáxias anãs pois possuem propriedades similares as de galáxias anãs observadas no Universo Local (Mirabel et al. (1992)). Além disso, apesar de ser produto de uma estrutura inicialmente ligada ao par de galáxias, as *Tidal Dwarf Galaxies* (TDG) são objetos gravitacionalmente ligados.

5.2 Forças de maré e formação de caudas mareais

No capítulo 2, uma descrição sobre os mecanismos físicos nos levou a compreender que galáxias em interações estão imersas em um campo mareal. O resultado deste fenômeno é a deformação e rearranjo de suas componentes. Realizemos uma descrição matemática do funcionamento de um campo mareal.

Forças de maré são definidas como forças diferenciais gravitacionais atuando em um corpo extenso imerso no poço gravitacional de um objeto externo. Devido a sua extensão, há uma variação da intensidade do campo gravitacional em cada ponto do corpo. Consideremos uma galáxia em cujas proximidades encontra-se outra galáxia geradora de um poço potencial. A distância entre os centros das galáxias é suficientemente próxima, de forma que as estruturas internas de cada galáxia sofram influência do campo gravitacional de ambos os corpos.

Caso queiramos avaliar a aceleração em uma componente da galáxia A devido a sobreposição de potenciais, devemos levar em consideração que sua aceleração líquida terá contribuição do campo gravitacional da galáxia hospedeira A e do campo gerado pela fonte

externa. Devemos nos atentar que a aceleração mareal sobre a componente de A terá uma contribuição da aceleração diferencial devido a natureza extensa da galáxia A e uma contribuição da aceleração comum a toda galáxia, normalmente associada a aceleração no centro de massa de A.

Portanto, identificando \vec{r}_P como a posição da componente em relação ao centro de massa de A e \vec{r}_g a posição do centro de massa de A em relação ao centro de massa da galáxia perturbadora, obtemos a seguinte relação:

$$\vec{a}(\vec{r}_P) = \vec{a}_{int}(\vec{r}_P) + [\vec{a}_{ext}(\vec{r}_P) - \vec{a}_{ext}(\vec{r}_g)] \quad (5.1)$$

Definimos como $\vec{a}_{int}(\vec{r}_P)$ como a aceleração na componente em \vec{r}_P devido a galáxia A, $\vec{a}_{ext}(\vec{r}_P)$ a aceleração na componente em \vec{r}_P devido a galáxia perturbadora e $\vec{a}_{ext}(\vec{r}_g)$ a contribuição de aceleração na componente devido o efeito do campo perturbador no centro de massa da galáxia A. Para pequenas distâncias $\delta = \vec{r}_P - \vec{r}_g$ podemos realizar a aproximação em primeira ordem:

$$\vec{a}(\vec{r}_P) = \vec{a}_{int}(\vec{r}_P) + \delta d\vec{a}_{ext} \quad (5.2)$$

Podemos representar a aceleração na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \vec{a}_x(\vec{r}_P) \\ \vec{a}_y(\vec{r}_P) \\ \vec{a}_z(\vec{r}_P) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{a}_{int,x}(\vec{r}_P) \\ \vec{a}_{int,y}(\vec{r}_P) \\ \vec{a}_{int,z}(\vec{r}_P) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \left(\delta_x \frac{d}{dx} + \delta_y \frac{d}{dy} + \delta_z \frac{d}{dz} \right) \vec{a}_{ext,x} \\ \left(\delta_x \frac{d}{dx} + \delta_y \frac{d}{dy} + \delta_z \frac{d}{dz} \right) \vec{a}_{ext,y} \\ \left(\delta_x \frac{d}{dx} + \delta_y \frac{d}{dy} + \delta_z \frac{d}{dz} \right) \vec{a}_{ext,z} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

$$a_P^i = a_{int}^i(\vec{r}_P) + \delta_j \partial^j a_{ext}^i \quad (5.4)$$

A equação 5.4 traduz a equação 5.3 em notação de Einstein. Portanto, notamos que os efeitos das forças externas agindo nas componentes da galáxia perturbada podem ser definidos com o **tensor de maré**:

$$T^{ji} = \partial^j a_{ext}^i \quad (5.5)$$

O tensor de maré possui toda a informação a respeito da aceleração diferencial dentro da galáxia, portanto, o valor do tensor em um determinado ponto descreverá o campo mareal nessa localização. Considerado que o campo é estático e puramente gerado por forças gravitacionais, podemos inferir o potencial gravitacional como:

$$T^{ji} = -\partial^j \partial^i \phi_{ext} = -\partial^i \partial^j \phi_{ext} = T^{ij} \quad (5.6)$$

O grau de deformação das estruturas internas de uma galáxia dependem de como as estruturas estavam inicialmente distribuídas o que atribui um grau de dificuldade em sua detecção observacional. Uma galáxia espiral é composta por partes individuais que estão regularmente distribuídas em padrões. Portanto, quando esse tipo morfológico sofre influência de forças de maré, objetos que se encontram em regiões e com propriedades semelhantes sofrerão efeitos semelhantes. Já as galáxias elípticas possuem em sua composição objetos que estão distribuídos em movimento aleatório. Isso se traduz em uma fraca mudança global na estrutura desta galáxia quando em influência de forças diferenciais.

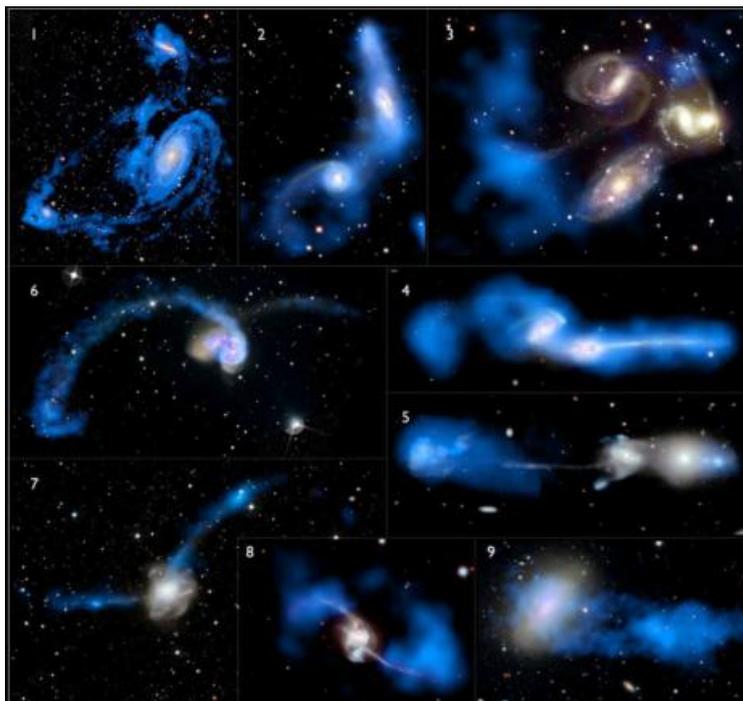


Figure 5.2: Duc and Renaud (2011) realizaram uma compilação de galáxias em processo de interação tornando evidentes as componentes estelares antigas, em cores óticas, e as componentes de hidrogênio atômico em azul. É possível observar que o hidrogênio molecular compõe majoritariamente a estrutura de uma cauda mareal. As imagens no ótico não necessariamente nos fornecerão dimensão real da extensão de uma cauda mareal.

Pode-se entender, portanto, a razão pela qual se é detectado com maior facilidade a presença de caudas mareais em objetos que possuem movimento bem organizado do que em estruturas quase isotrópicas em velocidade e posição. Em outras palavras, são em espirais de massas comparáveis (*major mergers*) que concentram-se a maior parte do estudo de caudas mareais e conseqüentemente galáxias mareais.

5.3 Componentes das caudas mareais

Análises fotométricas e espectroscópicas multibanda revelam propriedades da composição e subestruturação dos componentes em caudas mareais. A figura 5.2* apresenta diversos sistemas em diferentes estágios de interação. As componentes de HI (gás de hidrogênio atômico) estão representadas pela cor azul e estão superpostas às imagens das galáxias no ótico, permitindo que observemos as componentes estelares jovens e antigas.

Podemos destacar, primeiramente, que as imagens no ótico são insuficientes para determinar a real extensão das caudas mareais. Os mapeamentos de regiões de HI nos mostram que as caudas mareais são predominantemente formadas por hidrogênio atômico. Sistemas, como 1 e 3, não apresentam caudas e pontes entre as galáxias quando apenas observadas as imagens no ótico. Curiosos casos podem ser observados em 5 e 8 onde as componentes estelares e gasosas são completamente distinguidas.

*Duc & Renaud, 2013

O hidrogênio atômico é o componente mais massivo presente na caudas mareais (Walsh et al. (1979)). Possui formato mais alongado sendo menos ligado gravitacionalmente. Apresenta picos de densidade onde contém nuvens de hidrogênio molecular que permitem episódios de formação de estrelas. Essas regiões são responsáveis pela emissão em ultravioleta advindas de estrela do tipo O e B. Estrelas massivas possuem um período de vida de aproximadamente $\sim 10^7$ anos e simulações numéricas preveem que caudas sobrevivam por 10^8 milhões de anos, portanto, os eventos de formação estelar aconteceram *in-situ*.

As populações estelares das caudas apresentam cores médias indicando idades anteriores à interação, concluindo que foram formadas no disco da galáxia progenitora. Além disso, são encontradas componentes usuais de um meio interestelar das galáxias iniciais como monóxido de carbono (Braine et al. (2000)) e oxigênio (Weilbacher et al. (2003)).

5.4 Formação de Tidal Dwarf Galaxies

As simulações numéricas possuem papel fundamental no estudo da formação de *Tidal Dwarf Galaxies* nas caudas mareais. A quantidade de origens propostas são diversas e apresentamos algumas à seguir.

5.4.1 Instabilidades locais nas componentes estelares ou gasosas

Objetos gravitacionalmente ligados podem se formar como resultado de colapsos gravitacionais na componente estelar gerando um poço gravitacional capaz de capturar gás. A simulação encontra-se em Barnes and Hernquist (1992) cujas condições iniciais englobam duas galáxias espirais contendo predominantemente estrelas em planos de órbitas diferentes. Como resultado, componentes mareais se formaram contendo estruturas gravitacionalmente ligadas visíveis antes mesmo da fusão ser finalizada. Objetos mais massivos são encontrados mais próximos da fusão central enquanto objetos menos massivos se encontravam próximos as bordas das caudas. Essa distribuição pode ter acontecido pois objetos mais massivos são mais prováveis de sobreviver aos efeitos de maré devido a interação central.

Porém, o artigo discute a possibilidade dos objetos encontrados serem artefatos da simulação de N-corpos. Wetzstein et al. (2007) investiga a influência de diferentes resoluções nos resultados das simulações realizadas. Para simulações com maiores resoluções, a formação de subestruturas provenientes da origem estelar é suprimida. Entre as componentes da galáxia, a resolução do disco espiral demonstrou ser crucial na supressão do colapso artificial das regiões.

Durante o processo de evolução das caudas mareais, Wetzstein et al. (2007) observa que a presença de uma suficiente quantidade de massa e extensão de gás podem propiciar o colapso de acumulações de gás distantes do centro da colisão. Objetos colapsam durante a evolução das caudas mareais chegando a densidades estelares centrais comparáveis as de galáxias anãs observadas.

5.4.2 Ejeção de nuvens instáveis de gás molecular

O processo de interação entre duas galáxias espirais pode elevar a dispersão de velocidade no meio interestelar nos braços mais externos de uma galáxia. Alterações na dispersão de velocidade de um gás elevam em grandes fatores a massa de Jeans, definida como a massa mínima necessária para que um nuvem molecular colapse e forme estrelas, o que permite a formação de grandes complexos de gás molecular herdando altas dispersões. A massa da nuvem pode exceder valores de $10^8 M_{\odot}$.

Em geral, quando estrelas começam a se formar em nuvens, a pressão gerada por estrelas massivas aquecem o meio e cessam a formação estelar. Altas dispersões podem elevar a energia de ligação por massa, tornando a formação estelar mais eficiente. As forças de maré decorrentes da fusão podem ejetar esse complexo, até então apenas instável, de forma que colapsem ao chegar em grande distâncias galatocêntricas.

Elmegreen et al. (1993) utilizou destas implicações físicas em simulações concluindo que este cenário foi possível em interações entre galáxias de massa comparável. As nuvens tendem a ser formadas na região do disco oposta a galáxia companheira e a massa final depende da força da perturbação que é consequência da massa da companheira.

5.4.3 Modelo de formação monolítico

A extensão do halo de matéria escura pode ser um parâmetro crucial na formação de galáxias anãs. Caso ele seja suficientemente extenso, pelo menos 10 vezes maior do que o raio ótico, o processo pode ter origem cinemática. Ao invés do gás de uma região do disco ser espalhado ao longo da cauda, ele pode acumular-se perto ou no seu fim, mantendo uma alta densidade superficial. Inicialmente, o sistema será composto majoritariamente por gás mas contendo uma pequena fração de estrelas. Com a ação da gravidade, o gás colapsará favorecendo a formação estelar. Portanto a componente estelar é formada *in-situ*. O resultado de Duc et al. (2004) produz a fragmentação dessa nuvem dividindo-se em objetos com massas próximas a $10^9 M_{\odot}$. Este processo assemelha-se com a formação monolítica de galáxias, onde uma grande nuvem fragmenta-se em pequenas porções formando posteriormente galáxias.

5.4.4 Modos de compressão em forças mareais

A sobreposição dos potenciais das galáxias interagentes pode gerar regiões de compressão nas caudas mareais durante tempo suficiente para permitir a formação estelar ou até proteção de sua destruição.

Pela figura 5.3, podemos observar a evolução temporal do encontro entre duas galáxias com massas equivalentes e com condições similares a galáxia Antena. Renaud et al. (2009) analisa o histórico do evento focando-se nos modos de compressão originados. Os pontos vermelhos representam partículas em completo modo de compressão. As caudas se expandem à medida que o processo evolui, de forma que as regiões de compressão seguem o mesmo padrão. Inicialmente elas se encontram na região central e, à medida que os potenciais se sobrepõem, os modos se propagam pelas caudas como é possível ver entre 50 Myr e 150 Myr. A segunda passagem da galáxia, que ocorre próximo a 250 Myr após o início da simulação,

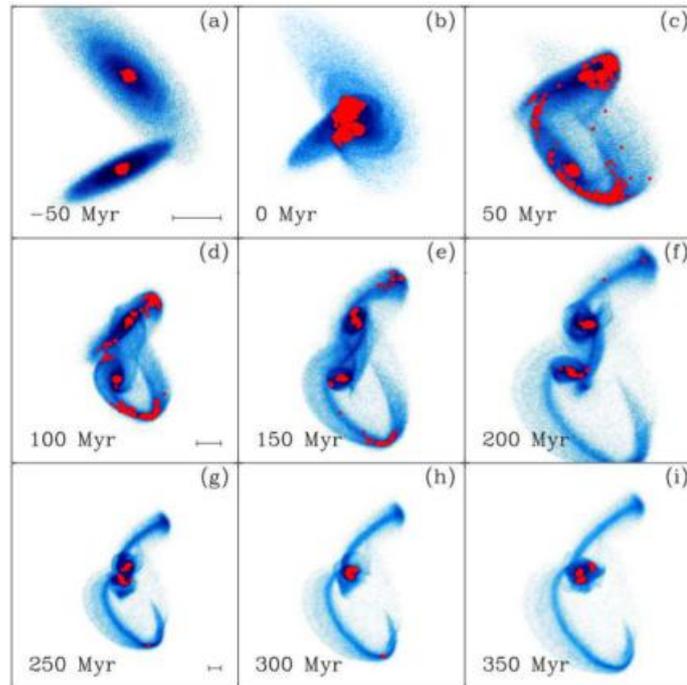


Figure 5.3: Renaud et al. (2009) simula encontro entre duas galáxias as quais evoluem para um sistema similar ao que se observa da galáxia Antena. Cada quadrante representa um momento da evolução a cada 50 milhões de anos. Os pontos vermelhos representam partículas que estão em estado completo de compressão.

permite o aparecimento de regiões de compressão na região central novamente, mas os braços não são afetados. Sendo feita uma comparação com a galáxia Antena, pode-se supor que ela encontra em um estágio similar ao do quadrante *h*. No fim das caudas mareais é possível observar regiões de compressão o que concorda com as observações que identificam uma candidata a *Tidal Dwarf Galaxy* nas pontas de Antena Mirabel et al. (1992).

5.5 Ambientes de grupos compactos

Grupos compactos são sistemas compostos de até algumas dezenas de galáxias dispostas em um volume de poucos milhões de *parsecs* (Hickson (1982)). Devido a elevada densidade de objetos, esses sistemas apresentam frequentes episódios de fusões entre seus membros, tornando possível a gênese de galáxias anãs mareais, pelos processos descritos neste capítulo. Apresentamos nesta seção dois trabalhos que objetivaram identificar galáxias anãs fruto de interações entre galáxias espirais massivas. Essa discussão será pertinente para o desenvolvimento de nossa metodologia.

de Mello et al. (2008) ministrou um procedimento de detecção de pequenos objetos tendo como foco central o grupo compacto HCG100. Dispondo de dados em diferentes comprimentos de onda, objetivou-se detectar regiões de formação estelar no meio intragrupo, principalmente nas caudas mareais geradas pela interação entre as galáxias mais brilhantes.

Para a identificação de aglomerações de estrelas, utilizou-se das imagens no ultravioleta próximo e distante, coletadas pelo telescópio GALEX. Além disso, foram coletadas imagens

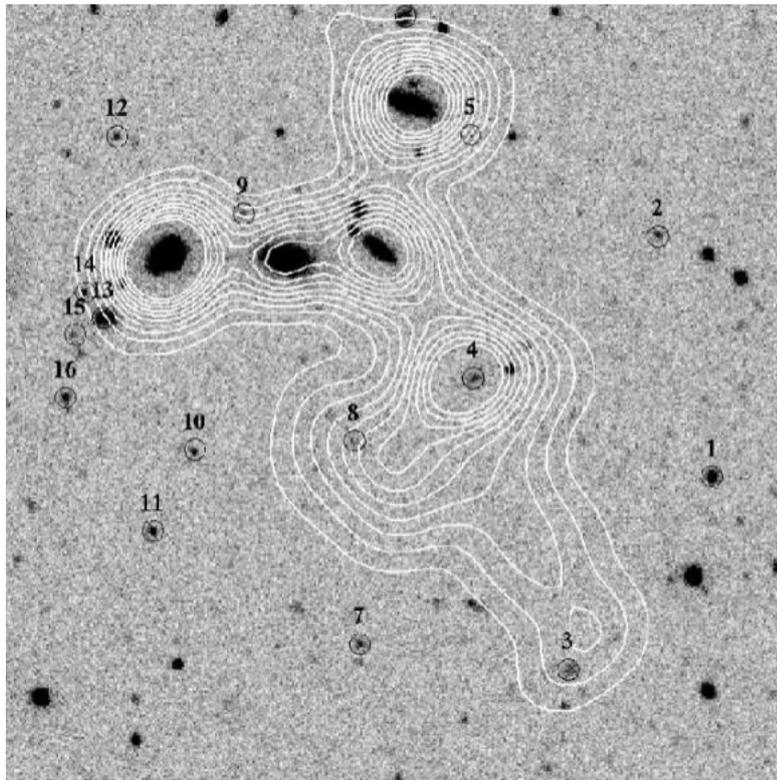


Figure 5.4: Imagem na banda NUV do telescópio GALEX de parâmetros $10' \times 10'$. Os objetos detectados intragrupo encontram-se circulado em preto e identificados por números de 1 a 16. As curvas contínuas brancas representam curvas de contorno para emissão de HI. Podemos notar que na região central e quadrante sudeste da imagem há a presença de gás de hidrogênio atômico.

na banda R e mapas de HI a fim localizar caudas mareais no sistema. A análise das imagens, objetivando a busca de regiões de emissão nas vizinhanças do grupo, iniciou-se realizando a detecção de fontes pelo programa SExtractor. Como resultado do processo, catálogos foram gerados para cada imagem em suas respectivas bandas. Cada catálogo continha as posições e fotometrias utilizando a abertura elíptica de Kron. A combinação entre os catálogos foi realizada de forma que apenas foram considerados os objetos que também possuíam fotometria na banda FUV. Caso contrário, seriam descartados.

Como resultado, além da detecção e fotometria das galáxias pertencentes ao grupo, foram identificados 16 objetos com acentuada emissão de radiação ultravioleta, sendo nove desses objetos dispostos ao longo de caudas mareais, como é possível observar na imagem 5.4, referente a banda NUV em um campo de $10' \times 10'$. Na imagem, encontram-se assinaladas as regiões detectadas numeradas de 1 a 16. As galáxias extensas são identificadas pelas letras a, b, c e d. Os contornos identificam regiões de HI obtidos por Verdes-Montenegro et al. (2005) indicando uma cauda mareal na região sudeste do sistema, na qual é centralizada a imagem. Nessa região de forte concentração de hidrogênio atômico, presenciamos a detecção de alguns objetos candidatos a *tidal dwarf galaxies*. Utilizando as cores FUV - NUV de cada objeto associado a modelos de populações estelares (Thilker et al. (2005)), concluiu-se que os objetos são mais jovens que ~ 200 milhões de anos. É importante salientar que, apesar de se dispor em regiões de caudas mareais, uma análise espectroscópica é necessária para confirmar se os objetos são interiores ao sistema. Para os objetos 3 e 4 tal confirmação de serem galáxias

Grupo compacto	Σ Grupo Compacto	Σ Amostra de controle 1	Σ Amostra de controle 2	Σ Amostra de controle 3
HCG 2	0.07 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.16 ± 0.03
HCG 7	0.15 ± 0.04	0.16 ± 0.03	0.20 ± 0.03	0.17 ± 0.03
HCG 22	0.25 ± 0.07	0.12 ± 0.03	0.11 ± 0.03	0.13 ± 0.03
HCG 23	0.06 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.13 ± 0.03	0.11 ± 0.03
HCG 100	0.28 ± 0.05	0.05 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.08 ± 0.02
NGC 92	0.20 ± 0.07	0.09 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.14 ± 0.03

Table 5.1: Reproduzimos nesta tabela os resultados de Torres-Flores et al. (2009) a partir da análise das densidade numéricas dos grupos. A primeira coluna identifica a qual grupo pertence a densidade numérica. A segunda coluna nos dá o valor encontrado da densidade numérica com seu respectivo erro e as demais colunas referem-se a densidade numérica dos campos de controle

mareias foi possível por de Mello et al. (2012) graças a medida espectrocópica desses dois objetos.

Torres-Flores et al. (2009) expandiu os princípios utilizados por de Mello et al. (2008) para um conjunto representativo de grupos compactos compostos pelos sistemas: HCG 2, 7, 22, 23, 92, 100 e NGC 92. Além da busca de objetos recentes no meio intragrupo de cada sistema, objetivou-se elucidar o estágio de interação de cada grupo compacto.

Assim como o trabalho anterior, a detecção de objetos centralizou-se nas imagens de cada grupo nas bandas FUV, NUV além das imagens complementares na banda R e mapas de HI na identificação de caudas mareais. Na análise dos estágios evolutivos associados a cada grupo, disporem-se de campos de velocidade de *Fabry-Perot* e curvas de rotação. Porém, foquemo-nos no procedimento utilizado para a identificação de candidatas a galáxias anãs, apenas.

Os processos de detecção de regiões de formação estelar são semelhantes ao trabalho anterior. O programa SExtractor gerou catálogos nas imagens de cada banda e, a seguir, realizou-se uma combinação de regiões levando em consideração apenas os objetos com fotometria FUV.

A análise fotométrica e numérica se baseou na comparação do campo definido para cada grupo e três regiões denominadas controles da amostra. A região do grupo define-se como uma região circular com centro no centroide do grupo. O raio desse campo é igual a duas vezes o raio da circunferência mínima que contém o centro de todos os membros massivos do grupo. Em contrapartida, as regiões referentes aos controles são definidas como regiões retiradas da mesma imagem do GALEX que contém os grupos, mas que não contenha o grupo.

A primeira análise se relaciona a verificação do excesso de emissão de radiação ultravioleta nas regiões pertencentes aos grupos. O parâmetro utilizado para demonstrar tal comportamento é a densidade superficial de objetos. A densidade do campo é definida como a quantidade de objetos dentro da região delimitada como pertencente ao campo dividida pela área total do grupo excluindo a área relativa as galáxias membro. Reproduzimos os resultados encontrados pela tabela 5.1.

A tabela fornece os valores das densidades superficiais numéricas de cada grupo, assinaladas na coluna Σ *Grupo Compacto*, seguidas das colunas que contém os valores para as amostras de controle. Concluimos, ao realizar o comparativo entre as densidades superficiais, que os grupos HCG 2,7, 23 e NGC 92 não apresentam excesso de emissão pois apresentam valores de densidades superficiais próximos aos valores dos grupos de controle. Os grupos HCG 22 e e 100, em comparação com as densidades de controle, apresentam elevados valores

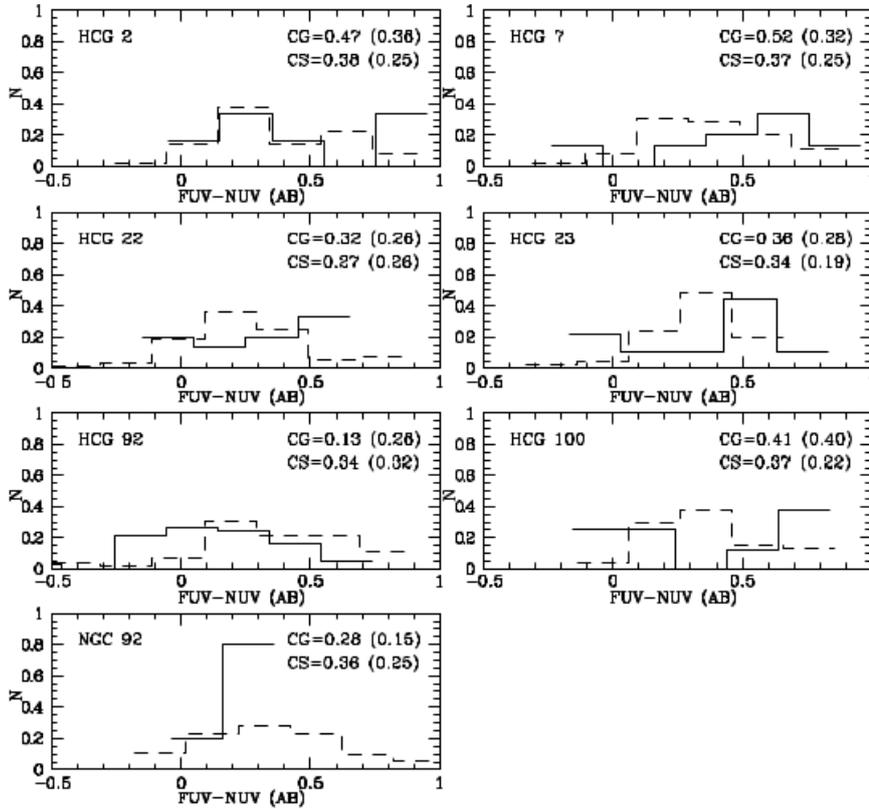


Figure 5.5: Histogramas mostrando as distribuições FUV - NUV. As linhas sólidas são relativas as regiões intragrupos e as linhas tracejadas são relativas as regiões de controle. No canto superior esquerdo temos o indicativo de qual par o gráfico menciona e no canto superior esquerda temos informações sobre as médias e os desvios padrões em parênteses.

porém, as barras de erro são altas, não permitindo uma conclusão pelo método aplicado. A maior densidade superficial de todos os grupos é apresentada pela galáxia HCG 92.

Outro método utilizado no estudo é referente a comparação entre a distribuição de cor FUV - NUV dos objetos identificados nos grupos compactos e das regiões de controle, representados na imagem 5.5. Para cada quadrante, os histogramas sólidos representam as distribuições dos pares e os histogramas tracejados representam as distribuições dos grupos de controle. As médias e respectivos desvios padrões são expostas no canto superior direito de cada quadrante.

Inicialmente, notamos que as distribuições de cores dos ambientes de controle são similares entre si. Apenas as populações de HCG 92 e 100 apresentam distribuições mais azuis que a média, aportadas por $(FUV - NUV)_{HCG 92} = 0.13 \pm 0.26$ e $(FUV - NUV)_{HCG 100} = 0.41 \pm 0.40$. HCG 100 e HCG 23 apresentam distribuições bimodais.

HCG 7 e HCG 22 apresentam comportamentos similares, mais avermelhados do que a média, com picos em $(FUV - NUV)_{HCG 7} = 0.58 \pm 0.32$ e $(FUV - NUV)_{HCG 22} = 0.32 \pm 0.26$, respectivamente. NGC 92 apresenta um único pico em $(FUV - NUV)_{NGC 92} = 0.28 \pm 0.16$. Uma das conclusões finais é a descoberta, sujeita à confirmação espectrocópica, de galáxias anãs na caudas meareias no grupo HGC 92, como é possível observar pela figura 5.6 relativa a banda NUV. No histograma analisado, podemos observar uma população mais azul que a média. Portanto, esse tipo de estudo vinculado com a análise comparativa de densidades

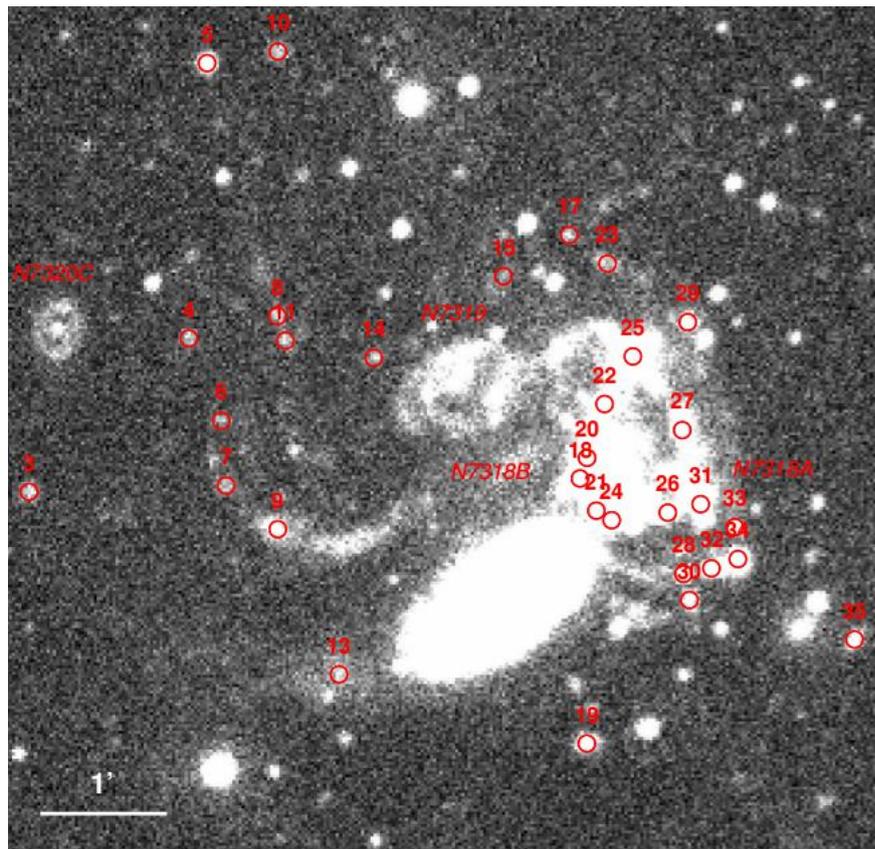


Figure 5.6: Reprodução de Torres-Flores et al. (2009) sobre o grupo compacto HCG 92. Os objetos identificados encontram-se destacados em círculos vermelhos numerados de 1 a 36. Observamos uma grande quantidade de objetos (18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27) dispostos em uma região de grande emissão de radiação ultravioleta, identificada como uma cauda mareal.

superficiais se demonstra uma maneira eficiente de identificar excessos de fonte de radiação ultravioleta devido a galáxias anãs produtos de interações entre galáxias.

Neste capítulo, discutimos a formação de galáxias anãs como produto de interações entre galáxias massivas. As forças mareais possuem papel fundamental na reestruturação das galáxias progenitoras. Os resultados finais das colisões apresentam uma diversidade de estruturas filamentosas compostas dos materiais reciclados das galáxias espirais e de regiões de formação estelar, devido a instabilidade gerado pelo evento.

Ao longo das caudas, diversas observações detectaram estruturas cujas propriedades se assemelham as de galáxias geralmente localizadas nas redondezas de galáxias espirais. Descrevemos neste capítulo diversas propostas fruto de simulações que pretendem explicar a formação dessas estruturas.

Abordamos métodos de detecção desses objetos presentes na literatura. Devido a sua eficiência, utilizaremos essa metodologia como base para realizar um procedimento de detecção de estruturas recentes ao redor de pares de galáxias.

Apesar de não se haver um consenso de um cenário mais provável, a discussão foi necessária para que possamos entender os objetos de interesse de nosso projeto. Desejamos

identificar galáxias anãs ao redor de galáxias em interação, possivelmente originadas pelos processos descritos acima. Porém, como vimos no capítulo 4, que essa não é a única origem para o surgimento dessas galáxias. O processo dominante de formação é intrinsicamente ligado a formação de estruturas durante a evolução do Universo.

Chapter 6

Método de seleção da amostra

6.1 Motivação e objetivos

Tendo em vista o conhecimento exposto nos capítulos anteriores, temos interesse em realizar um estudo em uma amostra de galáxias em interação, a fim de entendermos melhor como o ambiente se afeta durante todo o processo de perturbação.

Como descrito, uma galáxia espiral isolada possui uma quantidade de dezenas de galáxias satélites em suas redondezas. A formação desse sistema foi possível por um histórico, regido pela matéria escura, de crescimento de densidade de matéria, seguido de um colapso gerando a galáxia principal. Como os processos de interação e acreção são frequentes, um halo massivo de matéria escura poderá canibalizar halos menos massivos. Entretanto, o material desses pequenos halos pode não ser diluído no interior do halo massivo, permanecendo com sua estrutura inicial preservada. Os subhalos poderão se condensar e formar galáxias anãs. Ligados ao poço potencial da galáxia massiva, o destino desses sistemas, quando já condensados, será a ruptura de sua estrutura interna e seguida introdução no halo galáctico.

A detecção local de galáxias anãs não condiz com as predições das simulações numéricas de densidades de objetos ao redor de halos massivos de matéria escura. Conhecemos aproximadamente 50 galáxias anãs pertencentes ao Grupo Local. Os modelos de formação de estrutura identificam um total de dezenas a milhares de objetos para apenas um único halo massivo de matéria escura. Diversas explicações são propostas para a solução desta discrepância, desde a modificação do modelo de Λ CDM a processos envolvendo a física dominada pela matéria bariônica. Analisarmos se esse comportamento ocorre em sistemas extragalácticos nos permite inferir conclusões a respeito do sistema no qual estamos inseridos.

Os processos de interação e fusão não se restringem apenas a pequenas escalas do início da formação do Universo. Halos massivos, cujas regiões centrais comportam uma galáxia, poderão experimentar processos de colisão. Portanto as galáxias centrais, compostas de matéria bariônica, participam do processo tendo sua estrutura modificada. Focando-nos nas galáxias satélites, seu destino será a ruptura pelas forças mareais e possível acreção de seu material na região central da fusão. Porém, pelo mesmo mecanismo em que essa subestruturas são perdidas, novas estruturas são capazes de ser geradas caso as galáxias progenitoras tenham

condições iniciais favoráveis.

Objetivamos nesse trabalho testar a hipótese de que grandes interações entre galáxias massivas produzam, como consequência, a formação de aglomerações estelares ou de gás detectáveis pela nossa instrumentação observacional disponível. Identificando objetos candidatos a produtos dessa interação, poderíamos supor um processo, talvez não dominante, de formação de galáxias anãs no Universo. Utilizaremos como base a metodologia descrita no capítulo 4, desenvolvida por Torres-Flores et al., 2009.

O teste de hipótese será realizado de forma a escolher colisões nas quais possamos observar pequenos sistemas nas vizinhanças sob iminência de destruição por forças mareais ou por serem produtos dessa interação. Para tanto, necessitamos inicialmente, definir condições observacionais que permitam tal identificação. Tendo em mãos uma amostra de galáxias em interação condizente com os critérios impostos, apontaremos nesse ambiente regiões de formação estelar recente, utilizando programas dedicados.

Após identificarmos as candidatas a galáxias anãs, utilizamos duas abordagens a fim de testar nossa hipótese:

- Caso encontremos um número de galáxias de baixo brilho ao redor dessas interações maior do que o ambiente do campo, poderíamos considerar como uma aglomeração de pequenas estruturas produzidas pela interação.
- As cores de objetos de baixo brilho ao redor dessas interações poderiam indicar um efeito causal sobre a formação estelar nos aglomerados estelares ou de gás que estejam próximos.

Nas próximas seções deste capítulo discutiremos os critérios de seleção de pares possíveis de abrigar pequenas aglomerações de galáxias populando as regiões adjacentes do sistema. À seguir, administraremos buscas de regiões fonte de ultravioleta nas redondezas utilizando programas desenvolvidos para tal fim.

6.2 Métodos de identificação de pares em *Big Data*

Os levantamentos astronômicos possibilitaram o surgimento de bancos de dados com uma extensa quantidade de informações sobre os mais diversos objetos astronômicos. Embora os objetos amplamente descritos pela literatura sejam facilmente acessados pelos dados, a busca por objetos peculiares ainda exige que novos métodos de seleção sejam desenvolvidos. É necessário considerar o nível de complexidade e possíveis restrições computacionais.

No estudo de galáxias em interação, diversos métodos de seleção estão a disposição. A identificação de pares através da simples inspeção visual não possui grande vantagem devido a grande quantidade de dados a serem analisados, e ao viés associado à nossa limitada capacidade de reconhecer assinaturas de fusões e variação na distribuição de brilho. Alguns trabalhos, a fim de contornar este problema, mesclam etapas de inspeção automática e visual.

Hwang and Chang (2009) automatiza a procura de pares tendo como princípio básico a morfologia de um evento em interação. Um método de reconhecimento de padrões é eficaz

na detecção de pares pois, durante a interação, as forças mareais perturbam e reorganizam as estruturas originais produzindo formatos característicos. Essas assinaturas de interação são a base para um algoritmo de reconhecimento de padrões. O procedimento foi aplicado nas imagens na banda r de uma fração do céu disponível no *Red Sequence Cluster Survey 2*, que caracteriza-se como um levantamento de campo aberto tomado pelo *CFHT telescope* (Gilbank et al. (2011)).

O procedimento se inicia com a transformação das imagens em arquivos binários de forma que um píxel assumirá valor 0 ou 1 caso ultrapasse ou não um limite predefinido. Um grupo de pixels adjacentes que excedem o limite é considerado um objeto. Para a diferenciação entre fontes pontuais e extensas é ajustado uma elipse e o objeto é considerado uma galáxia caso metade do semi-eixo maior da elipse seja superior a uma quantidade mínima de pixels predefinida. A nova etapa analisa se o objeto extenso está ou não em interação por um parâmetro de assimetria. Para a confirmação dos candidatos é realizada uma análise visual.

A análise automática aplicada é dependente de uma confirmação visual pois identifica uma grande quantidade de falsos positivos. Além disso, o método utilizado possui dificuldade de confirmar objetos que são muito pequenos ou muito distantes. O'Leary and Kartaltepe (2013) também associa etapas automáticas e visuais no banco de dados do *CANDELS GOODS-South* com uma análise morfológica mais robusta.

Inicialmente cada galáxia é classificada manualmente por 3 a 6 pessoas pertencente ao time de investigadores em imagens nas bandas V, Z, J, H e mapas de segmentação extraídos do SExtractor. Essa primeira etapa permite diminuir o viés humano. A classificação não se ateve apenas a objetos interatuantes, foram atribuídas classificações de tipo de galáxias.

Em uma outra abordagem automatizada, às imagens foram identificados diversos parâmetros e destes parâmetros foram correlacionados a fim de observar se objetos interatuantes se concentram em regiões específicas de gráficos. Ao se realizar um comparativo entre as duas formas de inspecção, é observado que a classificação visual apresentou mais objetos interatuantes do que a classificação automatizada.

Shamir and Wallin (2014) apresentam uma alternativa exclusivamente automatizada. A investigação foi realizada em imagens de galáxias na banda $i < 18$ do banco de dados do SDSS. Um algoritmo inicialmente age em uma determinada imagem a fim de reconhecer a presença de galáxias vizinhas sendo aplicada uma *flag* (notificação), assinalando como candidato a fusão. Devido a possibilidade dos candidatos não serem galáxias, é retirada da imagem um conjunto de descritores representados por um vetor. Este vetor contém informações como formato, cor, distribuição de pixels, entre outros. O algoritmo passou por um processo de aprendizado à medida que subconjuntos da amostra total foram classificadas manualmente gerando um total de 500 amostras teste. Após o treinamento, o algoritmo foi aplicado na amostra total. Por fim, um último algoritmo foi aplicado de forma a identificar pares com composições peculiares. O artigo analisa visualmente os 500 primeiros pares identificados pelo método.

Os trabalhos descritos acima identificam a complexidade encontrada no processo de classificação de pares de galáxias em grandes levantamento astronômicos. Apesar dos resultados serem satisfatórios, a manipulação de imageamento apresenta desvantagens pois consome espaço de máquina e exige uma série de etapas que podem tornar o processo lento. No último trabalho, por exemplo, foi preciso obter $3.7 \cdot 10^6$ imagens para posterior análise. A inspecção humana visual também mostra-se desinteressante pois está vinculada ao caráter subjetivo do

classificador.

Encontrar um método simples e eficiente é a motivação para o desenvolvimento do projeto *Big Data of The Huge Universe* (BIDHU). Com início no ano de 2015, o objetivo geral é obter uma ferramenta para detecção de galáxias em colisão com boa usabilidade e performance em relação a técnicas e métodos disponíveis na literatura. O banco de dados utilizado foi o DR10 do *Sloan Digital Sky Survey*.

O critério de busca assemelha-se ao critério utilizado por Allam et al. (2004). Para lidar com a grande quantidade de galáxias e parâmetros associados, impomos que, para dois objetos serem considerados como candidatos a um sistema em interação, a separação angular deve ser pequena o suficiente pela natural proximidade física dos objetos. O valor escolhido e as implicações dessa escolha serão discutidas nas seções à seguir.

6.3 Sloan Digital Sky Survey

O *Sloan Digital Sky Survey* é um levantamento astronômico focado no imageamento multi-filtro e espectroscopia de alta resolução. Majoritariamente, a coleta de dados foi realizada em dedicação exclusiva do telescópio ótico de dois metros de abertura localizado no *Apache Point Observatory* no Novo México, Estados Unidos (Gunn et al. (2006)). A 4ª geração de tomada de dados, SDSSIV, está utilizando o *The Irénée du Pont Telescope* localizado no Observatório de Las Campanas, no norte do Chile (Bowen and Vaughan (1973)).

O imageamento se iniciou em Setembro de 1998 e seguiu em coleta até Novembro de 2009. Aproximadamente, 35000 graus quadrados de imagem foram tomados o que significa uma cobertura de 14055 graus quadrados do céu. Os dados foram lançados em, até então, 13 *data releases* e a coleta foi dividida em quatro fases cujas missões são brevemente descritas:

- ***SDSS Legacy Survey***: objetivou criar um mapa pelas bandas *ugriz* de 7500 graus quadrados do céu Norte e 740 graus quadrados do céu Sul. (York et al. (2000))
- ***Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration (SEGUE I e II)***: Objetivou a criação de um mapa tridimensional da Galáxia além de proporcionar o estudo de suas componentes para entendermos a formação, evolução e estrutura de nossa Galáxia. (Allende Prieto et al. (2008); Lee et al. (2008); Allende Prieto et al. (2008))
- ***Sloan Supernova Survey*** : Objetivou a busca por Supernovas tipo Ia, observando 300 graus quadrados do céu a fim de identificar repentinas mudanças de intensidade de brilho. Resultou em aproximadamente 5000 supernovas identificadas e um conjunto de objetos transientes candidatos a supernova. (Frieman et al. (2008))
- ***APO Galactic Evolution Experiment (APOGEE)*** :Abordagem espectroscópica no estudo de estrelas gigantes vermelhas localizadas no bojo, barra, disco e halo galáctico. A espectroscopia foi de alta resolução e alta razão sinal-ruído no infravermelho para penetrar nas nuvens de poeira que obscuressem esses objetos. (Majewski et al. (2015))

	u	g	r	i	z
λ_{media} (Å)	3551	4686	6165	7481	8931
Mag. limite	22.0	22.2	22.2	21.3	20.5

Table 6.1: Valores do comprimento de onda médio e magnitude limite associadas as bandas *ugriz* do SDSS.

- ***Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS e eBOSS)*** : Objetivou medir a taxa de expansão do Universo ao mapear a distribuição espacial de galáxias vermelhas luminosas e quasares e detectar a escala característica aplicadas pelas oscilações acústica bariônica no início do Universo. (Dawson et al. (2013))
- ***Multi-object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey (MARVELS)*** : objetiva monitorar a velocidade radial de estrelas com a precisão necessária para detectar planetas gigantes gasosos.*
- ***Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA)*** : objetiva explorar a estrutura interna de ~ 10000 galáxias próximas utilizando espectroscopia de campo integral. Construção de mapas de áreas pertencentes às galáxias permitindo análises mais profundas de suas estruturas. (Bundy et al. (2015))

Tendo em vista a diversidade de informações disponíveis pelo SDSS, escolhemos este levantamento como banco de dados como base para nosso processo metodológico. A missão **SDSS Legacy Survey** nos fornece informações sobre as coordenadas equatoriais, valores de magnitude e informações de distâncias necessárias para que sejamos capaz de selecionar pares em interação cujos ambientes favoreçam a detecção de subestruturas. Na tabela 6.1 observamos algumas informações sobre as magnitudes disponíveis pelo SDSS. A figura 6.1 apresenta a eficiência quântica de cada banda e conseqüentemente sua respectiva faixa espectral de cobertura.

6.4 Critérios de identificação de pares

Como discutido na seção 6.2, estabelecemos como primeiro objetivo a busca de um método que nos permite assinalar, em um grande banco de dados, objetos em fase de interação galáctica utilizando parâmetros que tornem o processo simples bem como eficiente. A identificação direta nas imagens fotométricas exige uma elevada disponibilidade de memória e tempo computacional. Portanto, focamo-nos na manipulação dos parâmetros físicos já disponíveis no banco de dados do SDSS. Para cada objeto identificado no céu observado, é necessário adotar um sistema de identificação de forma que sua posterior localização seja precisamente possível.

Apresentamos nesta seção o sistema de coordenadas equatorial o qual é largamente utilizado pela comunidade astronômica. Sua definição e propriedades observacionais envolvidas nos permite realizar o cálculo de separação entre os objetos em um determinado levantamento. Dessa forma, é possível produzir uma distribuição espacial dos objetos e identificar objetos

*<http://www.sdss3.org/collaboration/description.pdf>

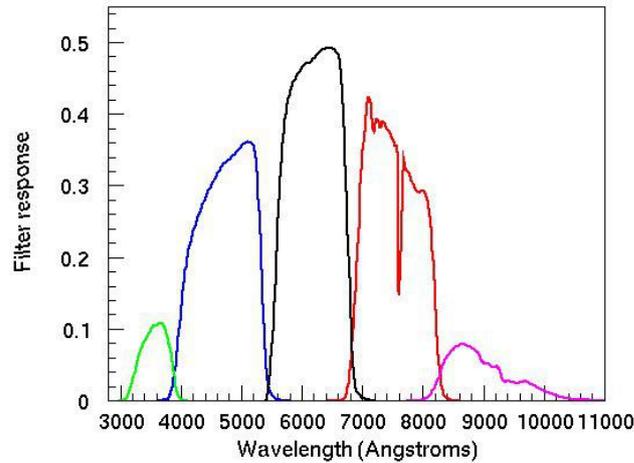


Figure 6.1: Eficiência quântica dos filtros do Sloan. Da esquerda para direita, observamos respectivamente a resposta para as bandas *u*, *g*, *r*, *i* e *z*.

próximos. Finalmente, discutimos quais foram os critérios dos parâmetros manipulados que nos permitem supor que dois objetos pertencem a um mesmo sistema ligado.

6.4.1 Sistema de coordenadas equatoriais

O Sistema de Coordenadas Equatoriais Celestes visa determinar um posicionamento para os astros celestes. A esfera celeste caracteriza-se como uma esfera imaginária de raio infinito cuja superfície dispõe a projeção dos objetos astronômicos. Essa conceituação se justifica pois os objetos que observamos estão em distâncias suficientemente elevadas para uma percepção tridimensional. A vantagem desse sistema encontra-se no fato de que não é dependente do movimento aparente dos astros gerado pela rotação da Terra.

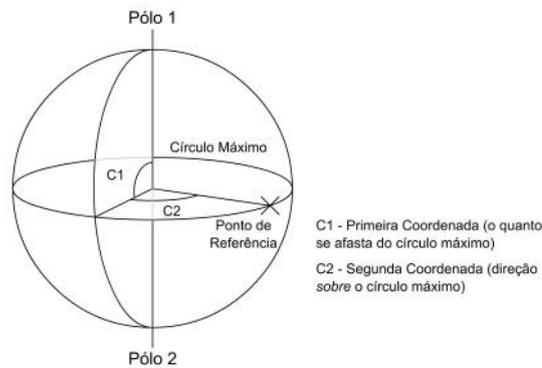


Figure 6.2: Representação da intersecção de um plano dividindo em duas regiões simétricas, resultando em um círculo máximo. Considera-se que os astros estão distribuídos na superfície da esfera. C1 e C2 representam as coordenadas do sistema equatorial. Nota-se que a definição dos círculos máximos serão base para o determinação nessas coordenadas.

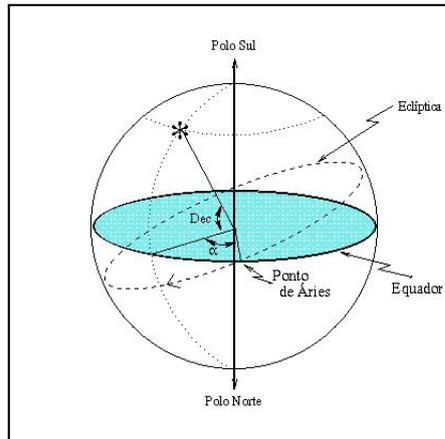


Figure 6.3: Representação ilustrativa do Sistema de Coordenadas Equatoriais. O círculo maior assinalado em azul identifica o plano equatorial. O círculo maior pontilhado representa o plano da eclíptica. A intersecção entre esses planos dá origem ao sistema de coordenadas, denominado como ponto vernal. As estrelas e galáxias se dispõem na superfície da esfera imaginária. Os ângulos assinalados são as coordenadas equatoriais ascensão reta e declinação.

Um plano principal define-se como o plano que divide uma esfera em duas regiões simétricas. A circunferência formada pela intersecção entre o plano e a esfera denomina-se grande círculo (figura 6.2[†]). Em um sistema de coordenadas baseado na esfera celeste, define-se um ponto de origem na superfície da esfera contido por um grande círculo principal. Outros planos que cortam a esfera porém não se centram na origem são chamados de círculos menores. Os círculos maiores perpendiculares ao círculo maior principal são denominados meridianos e os círculos menores paralelos são denominados latitudes.

A figura 6.3[‡] representa o Sistema de Coordenadas Equatoriais Celeste. A Terra encontra-se no centro da esfera celeste e os círculos máximos e menores serão utilizados para definir projeções de elementos terrestres e órbitas de objetos externos. O círculo maior principal do sistema é caracterizado pelo equador terrestre. O plano Equatorial celeste cruza um outro círculo máximo que representa a projeção da órbita solar em um ano, nomeado como eclíptica. A origem do sistema de coordenadas encontra-se no ponto de intersecção do equador celeste e da eclíptica, denominado ponto vernal γ . A projeção dos polos terrestres são denominados polos celestes e se encontram assinalados na figura.

Um objeto celeste poderá ser essencialmente definido por dois ângulos que não se alteram com o movimento diurno:

- Declinação (δ): Distância angular entre o equador celeste e o objeto, ao longo do meridiano que o contém. $\delta > 0$ na direção do polo norte celeste.
- Ascensão Reta (α): Distância angular entre o ponto vernal e o meridiano do objeto, ao longo do plano equatorial. $\alpha > 0$ na direção leste.

O Sistema de Coordenadas Equatoriais, assim como qualquer sistema, sofre variações devido a fenômenos físicos e movimentos inerentes à Terra. Entretanto, seu desvio é a curto prazo imperceptível em relação aos outros sistemas disponíveis.

[†]http://www.wikiwand.com/pt/Sistema_de_coordenadas_celestes

[‡]<http://astro.if.ufrgs.br/coord2.gif>

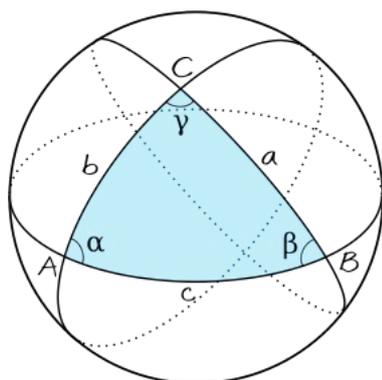


Figure 6.4: A intersecção entre 3 círculos máximos origina um triângulo esférico. a , b e c representam arcos cujo raio é igual ao raio da esfera e α , β e γ representam os ângulos entre as intersecções.

6.4.2 Triangulação esférica

Triângulos esféricos são figuras sobre uma superfície esférica formados pela intersecção de três círculos máximos. Os lados são formados por arcos cujo raio é o raio da esfera. Pela figura 6.4[§], podemos observar um triângulo esférico. Os valores a , b e c são as separações angulares entre os pontos de intersecção. Os ângulos α , β e γ são os ângulos entre os círculos principais.

Esta figura geométrica possui uma importante aplicação em astronomia pois, na implementação de um sistema de coordenadas, distribuimos estrelas e galáxias em uma esfera celeste. É possível construir triângulos esféricos a partir de argumentos utilizados no Sistema Equatorial.

A partir de propriedades intrínsecas aos triângulos esféricos, podemos contruir as seguintes leis:

- Lei dos cossenos

$$\cos\alpha = \cos\beta \cdot \cos\gamma + \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \cos a \quad (6.1)$$

$$\cos\beta = \cos\alpha \cdot \cos\gamma + \sin\alpha \cdot \sin\gamma \cdot \cos b \quad (6.2)$$

$$\cos\gamma = \cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos c \quad (6.3)$$

- Lei dos senos

$$\frac{\sin\alpha}{\sin a} = \frac{\sin\beta}{\sin b} = \frac{\sin\gamma}{\sin c} \quad (6.4)$$

[§]http://www.wikiwand.com/pt/Teorema_de_Pitagoras

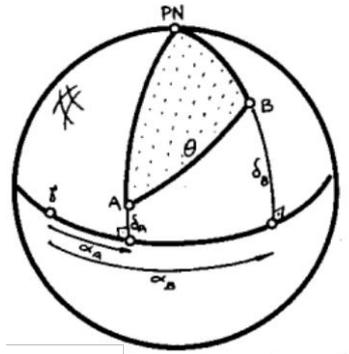


Figure 6.5: Determinamos a separação angular entre os pontos A e B utilizando as coordenadas equatoriais (α_a, δ_a) e (α_b, δ_b) , respectivamente. Os pontos A, B e PN (polo norte) formam um triângulo esférico o que torna possível utilizar as leis discutidas em 6.4.2 para encontrar θ . Fonte: Boscko

6.4.3 Separação angular

A tarefa de determinar a distância física entre dois objetos não é simples. Além de requerer o uso de técnicas astronômicas para determinar nossa distância ao objeto, é vital considerar que os objetos não estão a mesma distância entre si. Logo, adotamos uma abordagem de triangulação esférica à separação de objetos em um mesmo plano da esfera. Na figura 6.5, temos a presença de dois objetos astronômicos A e B, com respectivas coordenadas equatoriais (α_a, δ_a) e (α_b, δ_b) . Os dois pontos e o polo norte celeste formam um triângulo esférico, sendo possível então aplicar a lei dos cossenos para encontrar a separação angular entre A e B. Para tanto, definimos o arcos e ângulos em função dos argumentos do sistema equatorial.

Comparando as figuras 6.4.2 com 6.5 e utilizando a equação 6.3, estamos interessados em encontrar o valor de α , β e c . Como $\delta = 90^\circ$ no polo norte celeste:

$$\alpha = 90 - \delta_a \quad (6.5)$$

$$\beta = 90 - \delta_b \quad (6.6)$$

Utilizando a equação 6.3, podemos denotar que a separação angular é dada por:

$$c = \cos^{-1}(\sin(\delta_a) \cdot \sin(\delta_b) + \cos(\delta_a) \cdot \cos(\delta_b) \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_b)) \quad (6.7)$$

6.4.4 Critérios de seleção e limitações

Similarmente a Allam et al. (2004) definimos como critério de seleção a separação angular entre dois objetos. Em um catálogo contendo milhares de galáxias com respectivas coordenadas equatoriais de ascensão reta e declinação, podemos calcular a separação angular entre os objetos.

Colisões entre galáxias são eventos caracterizados pela interação gravitacional devido a uma grande proximidade. Para um observador na Terra, estas galáxias são observadas com uma pequena separação angular. A escolha de uma separação angular máxima para estes objetos como critério de seleção inicial permite que seja realizada uma automatização em comparação com as análises de imagens vistas anteriormente.

Nesse processo, devemos levar em consideração os fatores limitantes na identificação de pares. Um possível fator encontra-se na resolução angular de um determinado levantamento e a qualidade do céu no qual ocorreram as observações. A resolução angular de um objeto define-se como a mínima separação angular em que se pode distinguir dois objetos. Telescópios de maior porte possuem melhores resoluções devido à extensa área coletora. Porém, a atmosfera também deve ser levada em consideração pois ela gera turbulências ao longo da passagem da onda de luz. A escolha da separação angular deve, portanto, ser tal que permita a identificação dos objetos levando em consideração os limites apresentados.

Além disso, a separação angular é diretamente afetada pela distância do sistema ao observador, sendo um outro fator limitador. Para um par com mesma separação física, à medida em que sua distância aumenta até nós, a separação angular diminui. Portanto, um limite inferior pode ser estabelecido e assim identificado qual região do Universo estão os pares. Um limite superior do volume de distribuição é atribuído devido a profundidade das observações e a magnitude dos objetos.

O BIDHU desenvolveu seu método no *Data Release 10* do *Sloan Digital Sky Survey*. A resolução angular é aproximadamente $0.396''$ e o *seeing* médio do céu observado é $1.43''$ (Abazajian et al. (2009)). Uma separação de $1'$ permite um intervalo no qual é realizada uma suficiente diferenciação entre os objetos. Obviamente, os objetos tornam-se cada vez mais difíceis de serem identificados à medida que seu *redshift* aumenta.

A escolha da uma separação angular máxima implica numa limitação do Universo alcançado observacionalmente. A distância do observador ao objeto, a separação física entre os pares e a separação angular vista pelo observador são parâmetros acoplados. Uma análise permite pressupor a região do Universo disponível de se encontrar o objetos. Como será visto na seção 6.6.1, o ângulo entre dois objetos pode ser verificado por:

$$\theta = \frac{S \cdot H_o}{c \cdot z} \quad (6.8)$$

Sendo H_o a constante de *Hubble*, S a separação física entre os objetos, c a velocidade da luz e z o *redshift* ao objeto. Queremos objetos distantes por até $1' = 0.0002908$ rad, levando a um limite inferior de *redshift*:

$$z_{min} > \frac{S \cdot H_o}{0.0002908 \cdot c} \quad (6.9)$$

O *redshift* mínimo para identificar um par será portanto:

$$z_{min} = \frac{S \cdot 72}{0.0002908 \cdot 300000} = 0.000825309 \cdot S_{kpc} \quad (6.10)$$

Sendo S_{kpc} a separação física em kpc.

6.5 Execução método BIDHU

Toda a discussão da seção anterior objetivou entendermos o procedimento matemático que será aplicado nesta seção. Para a execução do método, necessitamos obter do banco de dados os parâmetros que identificam as coordenadas de localização da galáxias disponíveis. Tomando conhecimento sobre o Sistema Equatorial Celeste, definimos como as projeções das

galáxias distam em unidades de ângulo e adotamos tal parâmetro como base para definirmos um candidato a par interagente. Após análise da qualidade observacional do levantamento utilizado, adotamos como separação angular máxima para candidatar dois objetos a par em interação o valor de $1'$.

A aplicação do método consistiu da tomada da ascensão reta e declinação de um conjunto de galáxias no céu disponível do SDSS e cálculo da separação angular entre todos os objetos. Inicialmente, aplicamos alguns testes em pequenas porções do céu para verificarmos se os critérios adotados eram eficientes. À seguir, fomos capazes de aplicar a metodologia para todo o céu do levantamento.

6.5.1 Teste de método

Devido a grande quantidade de dados e nossa inicial limitação computacional, decidimos aplicar a metodologia para pequenas porções do céu. A coleta inicial dos dados foi realizada no site *SkyServer*[¶] no qual se encontram as informações disponíveis do levantamento. O banco de dados do SDSS se distribui em tabelas que são acessadas por uma pesquisa na linguagem SQL (*Structured Query Language* ou Linguagem de Consulta Estruturada).

O código de busca deve ser produzido de forma que atenda às especificações do projeto. Desejamos obter como saída objetos do tipo galáxia possíveis de serem observadas em um telescópio de médio porte, a fim de futuramente ser possível realizar uma missão observacional investigativa. Apesar da abrangência final ser todo o céu disponível pelo levantamento, devido a limitações computacionais, optamos por testar inicialmente uma pequena região do céu. A região escolhida se encontra dentro do intervalo de declinação $-0.01 < \delta < +0.01$. A vantagem dessa escolha está na possibilidade de observar os objetos tanto em telescópios do hemisfério sul quanto em telescópios do hemisfério norte.

Para observarmos as galáxias em telescópios de médio porte, as galáxias devem possuir magnitudes suficientes para tal. A seleção de galáxias deve possuir imposições nas magnitudes que apresentem indícios de formação estelar. Devido à presença de estrelas massivas em regiões de formação recente, a emissão de radiação em altas frequências é intensificada e portanto a análise em filtros azuis são necessárias na definição do critério. A imposição aconteceu no filtro *g* pois o filtro *u* é menos sensível, como vemos na figura 6.1.

Traduzindo na linguagem *SQL*, temos:

```
SELECT
  objId, ra,dec, u, g, r, i ,z

FROM Galaxy

WHERE

  dec BETWEEN -0.01 AND 0.01
  AND g BETWEEN 15 AND 21
```

[¶]<http://skyserver.sdss.org/>

A saída da pesquisa é uma tabela contendo a identificação no SDSS, a ascensão reta, declinação e a magnitude nos filtros *ugriz* de cada objeto identificado dentro do critério de declinação. Observa-se que entre todas as tabelas disponíveis no banco de dados do *Sloan*, escolhemos a tabela *Galaxy* que contém os objetos classificados fotometricamente como galáxias pela tabela *PhotoPrimary*. Desta pesquisa obtemos uma total de 7000 galáxias.

O próximo passo é o cálculo da separação angular entre os objetos. Seleciona-se cada galáxia e é calculado o ângulo entre os dois objetos a partir da equação 6.7. Esse processo foi automatizado a partir da criação de um programa em Python produzido por uns dos colaboradores do projeto (Barbosa (2015)). Após a tabela ser filtrada pelo código, obtivemos um total de 4730 candidatos a pares de galáxias. A tabela resultante possui a informações obtidas pelo SDSS das duas galáxias do suposto par.

Para se obter uma confirmação se os candidatos correspondem a pares reais, realizamos uma etapa de inspeção visual para uma pequena porção dos pares. Devido à fraca magnitude, foram analisados apenas os pares cuja magnitude se encontrava em $g < 18$, ou seja, um total de 128 objetos. Após a análise visual, foram confirmados 13 bons pares.

Uma segunda tentativa de familiaridade com o método foi realizado segundo os critérios $-0.33 < \delta < 0.33$ e $13 < g < 17.5$. Apenas 2000 galáxias foram analisadas do resultado de saída do programa de identificação de pares e foram realizadas inspeções apenas até encontrarmos 70 pares.

6.5.2 Contaminação da amostra

Nos dois testes realizados, tornou-se evidente a elevada contaminação de estrelas e componentes de uma mesma galáxia em uma amostra. Exemplos de objetos encontrados com classificação distoante podem ser visualizados nas figuras de 6.6. A explicação para tal fenômeno se deve à origem da subtabela *Galaxy* do SDSS.

Na realidade, *Galaxy* é uma *view*, uma tabela virtual criada a partir de tabelas primárias. O componentes desta *view* são objetos classificados fotometricamente da subtabela *PhotoPrimary*. A classificação fotométrica é automatizada utilizando o programa *SExtractor* como ferramenta para tal fim. Portanto, a classificação de um objeto está sujeita a erros computacionais. Realizando uma inspeção detalhada em objetos erroneamente identificados como galáxias, notamos que grande parte dos objetos revisados possuem *flags* de não confiabilidade de fotometria. Portanto, para o processo final de varredura de todo o céu disponível e consequente identificação de candidatos a pares de galáxias, optamos por trabalhar apenas com objetos com espectro, os quais estão disponíveis a classificação espectral.

Apesar da inspeção visual não ter sido feita em todos os objetos selecionados, caso seja considerado os 128 do primeiro teste que resultaram em 13 bons pares, observamos uma contaminação de 80% e regiões de formação estelar de uma mesma galáxia. O mesmo comportamento foi observado durante a análise de 2000 objetos na segunda fase do teste, portanto, é razoável supor que esta elevada contaminação ocorre em toda a amostra.

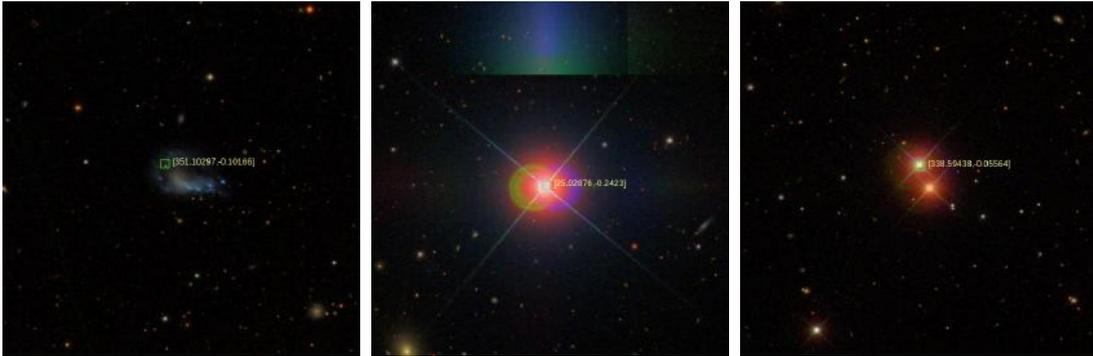


Figure 6.6: Três exemplos de contaminações encontradas durante a inspeção visual. À esquerda notamos que regiões de formação estelar dentro de uma única galáxia são classificadas como galáxias isoladas. Devido a proximidade, são identificados erroneamente como candidatas a interação. No centro, observa-se uma estrela saturada cuja fotometria não é confiável levando a classificação de galáxia. À direita, um exemplo de estrela binárias também classificadas erroneamente como galáxias

6.5.3 Aplicação do método para todo o céu

Após uma análise detalhada de todas as possibilidades capazes de eliminar a contaminação da fase de testes, decidimos que a *view Galaxy* seria abandonada e apenas utilizaríamos objetos cujo espectro estivesse disponível. Nesses casos, além da classificação fotométrica, a galáxia dispõe de uma classificação mais acurada pois o espectro releva características dos objetos que diferem completamente estrelas de galáxias.

A próxima etapa foi estender o método de seleção de pares para todo o céu disponível no SDSS, utilizando a tabela *PhotoPrimary*. Novamente, obtivemos como saída um conjunto de galáxias com suas respectivas coordenadas equatoriais, identificações padrão do Sloan, magnitude nas bandas *ugriz* e *redshift*. Para todas as galáxias foram calculadas as separações angulares entre todas e posteriormente verificado os objetos com distâncias menores que $1'$. No total, obtivemos 41799 candidatos a pares em interação. Nota-se que é necessário realizar uma confirmação de ligação gravitacional de tais sistemas.

A etapa seguinte, em progresso, é relacionada a criação de uma *learning machine* que confirmará se os conjuntos são de fato galáxias em processo de interação. O diferencial encontra-se no fato de que será trabalho em um conjunto de dados cuja probabilidade de representar galáxias em colisão é maior do que buscar companheiras em galáxia de campo.

Em suma, o objetivo deste trabalho de conclusão de curso foca-se no estudo de ambientes de galáxias em interação. Em suma, desenvolvemos um método simples de detecção de pares em interação que baseou-se na adoção de um critério de separação angular de $1'$. Caso uma galáxia possua em suas redondezas outra galáxia a uma distância menor do que o valor máximo estabelecido, o par estaria sujeito a uma análise visual. Preliminarmente, realizamos um teste em uma pequena porção do céu contida em $-0.01 < \delta < 0.01$ cujos objetos possuísem magnitude no intervalo de $15 < g < 21$ na tabela *Galaxy* do *Data Release 10* do *Sloan Digital Sky Survey*. Obtivemos como saída da busca no banco de dados do *SkySurvey* um total de 7000 galáxias. À seguir, calculamos a separação angular de cada galáxia em relação a demais galáxias pertencentes ao conjunto. 4730 candidatos a par de galáxias foram identificados sob o critério de $1'$. Analisamos visualmente 128 candidatos de forma que no total, identificamos 13 bons pares.

O mesmo processo foi repetido em uma região mais abrangente do céu contida em $-0.33 < \delta < 0.33$ e obedientes a $13 < g < 17.5$. 2000 galáxias foram analisadas de forma que 70 pares foram identificados. Após identificados os motivos pelos quais estávamos lidando com uma grande quantidade de estrelas e galáxias solitárias, abrangimos o método para todo o campo disponível. Para este projeto, a participação no projeto BIDHU se encerra nesta etapa. Na etapa seguinte, focamos na determinação de novos critérios que favoreçam a detecção de galáxias anãs e regiões de formação estelar no ambiente

6.6 Critérios ambientais

Para os candidatos a pares encontrados a partir da metodologia aplicado no BIDHU, temos disponíveis as coordenadas equatoriais de cada objeto, suas magnitudes *ugriz*, separação angular entre objetos e respectivos *redshifts*. Para o estudo realizado à seguir, objetivamos encontrar galáxias em interação cujos ambientes nos permitam identificar subestruturas fontes de radiação ultravioleta.

Determinar a distância física entre duas galáxias nos permite inferir a etapa temporal na qual a colisão se encontra. Galáxias com grandes distâncias, como é o caso de Andrômeda e a Galáxia separadas por 785 Kpc (McConnachie et al. (2005)), encontram-se em estágios iniciais de interação, cujos efeitos de maré ainda não são perceptíveis. Tais galáxias possuem em seu meio ambiente galáxias anãs apenas provenientes de interações anteriores ou da herança do colapso do halo de matéria escura progenitor. Galáxias com pequenas distâncias interpar estão em processo de eminente encontro ou em estados avançados de choque.

6.6.1 Distância de separação entre pares e entre sistema e observador

Até então, dispomos de uma separação devido a projeção dos astros na esfera celeste. Desenvolveremos nesta seção a formulação matemática que possibilitará calcular a distância física entre os objetos a fim de analisar os possíveis estágios de colisão de cada sistema.

A distribuição espacial entre o observador e o par pode ser representada pela figura 6.7. O posicionamento adotado se justifica pela distância das galáxias até nós, em regime de ângulos muito pequenos. Sendo θ a separação angular, S a separação física entre as galáxias e D a distância física do sistema até a Terra, temos:

$$\tan \theta = \frac{S}{D} \quad (6.11)$$

Como θ é um ângulo muito pequeno, permite-se aproximar:

$$\tan \theta \approx \theta \Rightarrow \theta = \frac{S}{D} \quad (6.12)$$

Como anteriormente discutido, Edwin Hubble relacionou a velocidade recessiva das galáxias com a distância até nós da seguinte forma:

$$v = H_o \cdot D \quad (6.13)$$

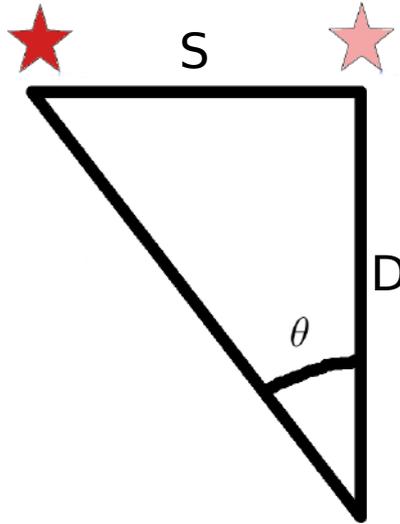


Figure 6.7: Disposição espacial adotado no cálculo de separação angular entre dois objetos astronômicos. Devido a grande distância entre a Terra e o sistema, podemos adotar um posicionamento por triângulo retângulo a fim de simplificação.

O *redshift* define-se como um parâmetro que quantifica o deslocamento do comprimento de onda de um feixe de luz devido à expansão do Universo. O mesmo princípio físico que atribui às galáxias velocidades recessivas, realiza uma expansão do comprimento de onda à medida que o feixe caminha pelo espaço-tempo. Podemos definir o redshift como:

$$z = \frac{\lambda_{observado} - \lambda_{emitido}}{\lambda_{emitido}} \quad (6.14)$$

No Universo local, as velocidades radiais de afastamento são pequenas comparadas à velocidade da luz, tornando a relação com o *redshift* linear:

$$v = c \cdot z \quad (6.15)$$

Relacionando as equações acima podemos obter a separação física entre galáxias:

$$S = \frac{\theta \cdot c \cdot z}{H_0} \quad (6.16)$$

Da mesma forma conseguimos obter a distância do sistema até nós:

$$D = \frac{c \cdot z}{H_0} \quad (6.17)$$

Durante o trabalho, adotamos como valor para a constante de *Hubble* $H_0 = 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Freedman (2000)).

O *redshift* utilizado na obtenção da distância do sistema à Terra é a média entre o redshift das duas galáxias. À princípio, a separação física não elimina efeitos de projeção. Portanto, a imposição de um critério de separação física aparente deve estar associada a imposição de um critério de separação radial entre pares.

6.6.2 Critérios e resultados

Iremos nos basear em três critérios a fim de obter uma subamostra final condizente com o ambiente a ser estudado. A principal necessidade da imposição de tais cortes está no fato de que estamos interessados em encontrar objetos fonte de radiação predominantemente ultravioleta, o que é um indicador de formação estelar. Portanto, as imagens a serem analisadas devem possuir parâmetros físicos que permitam tais detecções.

Galáxias em avançado estado de interação podem apresentar assinaturas mareais como a formação de pontes e caudas. Nessas regiões podem ocorrer a formação de galáxias anãs provenientes do matéria reciclada do evento. Utilizando como referência galáxias em estado similar a de casos avançados, como o caso de Antena com 6.4 Kpc de separação, adotamos a procura de galáxias com separação entre 5 e 9 kpc. A busca por pares com separações menores não se mostrou interessante pois muitos pares detectados eram novamente regiões de formação estelar de uma mesma galáxia erroneamente classificados como galáxias independentes.

O critério descrito não elimina a possibilidade de um aparente par ser apenas um efeito de projeção entre galáxias com grandes distâncias. A eliminação dessa possibilidade pode ser realizada impondo uma diferença máxima de velocidades de recessão entre as galáxias do par. Devido a expansão do Universo, quanto mais distante uma galáxia está de nós, mais rápida é sua velocidade de recessão. Portanto, esse pode ser um parâmetro que traduz distância, como discutido pela Lei de Hubble. Impomos como diferença máxima de velocidade de recessão uma estimativa de $v = 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Traduzido em redshift, $z_{max} \simeq 0.00333$, um par será considerado efeito de projeção caso ele possua uma diferença absoluta de *redshift* superior a z_{max} .

Finalmente, a distância do sistema à Terra possui limitações devido a detectabilidade das galáxias anãs presentes no meio. É exigido um limite superior de distância para que o levantamento utilizado seja capaz de detectar tais objetos. Podemos definir uma distância da forma:

$$D_{Mpc} = 10^{0.2 \cdot (m - B - M_B + 5)} \quad (6.18)$$

A magnitude na banda B absoluta de uma galáxia anã típica no grupo local é de $M_{lim} = -13$ (Mateo (1998)). A magnitude g e r limite do DR10 é 22.2. Como não temos disponível a magnitude aparente limite na banda B, é necessário realizar uma conversão (Windhorst et al. (1991)):

$$B_{lim} = g_{lim} + 0.51 + 0.60 \cdot (g - r) = 22.71 \quad (6.19)$$

Portanto pelo módulo da distância encontramos:

$$m_B - M_B = 5 \log(d) - 5 \Rightarrow d = 110 Mpc \quad (6.20)$$

Portanto, dentro desses critérios, podemos realizar uma seleção estatística completa de candidatas a galáxias anãs com magnitudes $M_B < -13$ nas vizinhanças dos pares interagentes. Em suma, escolhemos pares com distância entre si de 5 a 9 kpc, diferença de velocidades radiais de $\Delta < 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ e distância menores do que 110 Mpc até a Terra.

Após aplicar os cortes na tabela, pudemos encontrar um total de 35 candidatos. Realizando uma análise visual, encontramos um total de 16 bons pares em interação. Novamente,



Figure 6.8: O SDSS utiliza o *SExtractor* como forma de detecção de fontes. Esse programa possui um classificador interno que determina se um objeto é pontual ou extenso. Algumas galáxias possuem regiões de formação estelar evidentes levando ao *SExtractor* interpretar como uma fonte extensa isolada. Apresentamos dois exemplos de falsos positivos. As fontes detectadas estão separadas respectivamente por $S_{esquerda} = 6.5783$ kpc e $S_{direita} = 6.5744$ kpc

como o critério de separação física entre pares possui valor menor do que o diâmetro típico de uma galáxia, encontramos na maioria dos candidatos pseudopares devido a regiões de formação estelar de uma mesma galáxia, com pode ser visto na figura 6.8.

6.7 Extração das imagens GALEX

A detecção de um objeto deve ser realizada em uma imagem fotométrica cuja banda espectral destaque a radiação característica dos processos físicos que ocorrem neste objeto. A maior contribuição de radiação proveniente de uma galáxia anã com formação estelar recente está na faixa do ultravioleta. Descrevamos o processo físico de uma formação estelar a fim de entendermos a escolha do GALEX como banco de dados base para nossa busca de imageamento.

A formação de uma estrela advém do colapso de uma nuvem molecular presente no meio interestelar. Essas estruturas são compostas de hidrogênio molecular, grãos e outras moléculas em menor fração como o monóxido de carbono. Apresentam baixas temperaturas, da ordem de 10 K, massas no intervalo de $10^5 - 10^6 M_{\odot}$ e extensões da ordem de centenas de parsec. Devido a massa e extensão, estimamos densidades de $n \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$. No meio interestelar, encontram-se em equilíbrio hidrostático, obedecendo a relação:

$$\frac{dP_c}{dr} = -\frac{Gm}{r^2}\rho \quad (6.21)$$

Sendo P a pressão que uma casca esférica desse gás sofre em relação as outras cascas, G a constante gravitacional, ρ a densidade do gás e r o raio dessa casca esférica. Caso um mecanismo externo perturbe a nuvem de forma que não tenha tempo hábil para retornar ao equilíbrio, ela entrará em colapso. O critério de massa mínima para que ocorra o colapso é descrito pela massa de Jeans:

$$M_J = \left(\frac{\mathfrak{R}}{\mu G} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}} T^{\frac{3}{2}} \rho^{-\frac{1}{2}} \quad (6.22)$$

Sendo \mathfrak{R} a constante universal dos gases, μ o peso molecular do hidrogenio, e T a temperatura do gás. É possível observar que estrelas nascem em nuvens frias e densas que, com o colapso, fragmenta-se em estrelas de diversa massas. Funções empíricas que descrevem a distribuição de massa de uma população estelar recém-formada, denominadas funções de massa inicial, demonstram uma maior probabilidade de se formar estrelas de menor massa em detrimento das de maior massa (Kroupa (2001)).

A evolução de estrelas de variadas massas é bem estudada e conhecida pela Astrofísica Estelar Moderna. É sabido que as fases evolutivas de uma estrela dependem fortemente da massa inicial adquirida durante o colapso da nuvem. A formação de estrelas se inicia em uma nuvem de hidrogênio molecular fria que, por uma perturbação de origem desconhecida, colapsa formando milhares de estrelas com diferentes propriedades.

Uma estrela permanece a maior parte de sua vida queimando Hidrogênio em Hélio em seu núcleo, possibilitando que suporte a pressão das camadas superiores. O fim desta fase ocorre com o cessar do hidrogênio na região nuclear levando ao desequilíbrio e a eventos posteriores, também dependentes das condições iniciais.

A intensidade de radiação característica de uma estrela é aproximada a uma curva de corpo negro cujo valor em cada comprimento de onda do espectro é determinado pela lei de *Planck*:

$$B_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_b T}} - 1} \quad (6.23)$$

Porém, a distribuição de energia não se manifesta apenas como um espectro contínuo, como é observado na figura 6.9. Em determinados comprimentos de onda, observa-se linhas de absorção devido à absorção de fótons provenientes do interior estelar pelos gases da atmosfera estelar. A intensidade da radiação e sua faixa de maior emissão está associada a Lei de Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{0.0028976}{T} \quad (6.24)$$

Portanto, quanto maior a temperatura emitida por uma estrela mais próximo da faixa do azul ela se encontrará em emissão máxima.

Estrelas do tipo espectral O e B são consideradas estrelas massivas, pois possuem $M > 15M_\odot$. Devido à elevada temperatura, possuem alta emissão de radiação no ultravioleta. A massa é parâmetro crucial no tempo de vida de uma estrela. A evolução estelar é mais rápida em estrelas massivas. Uma estrela massiva possui tempo de vida de $\tau \simeq 3 \cdot 10^7$ anos.

Em comparação com estrelas menos massivas ($M \simeq M_\odot$), cujo tempo médio é de $\tau = 10^{10}$ anos, as estrelas de tipo O e B apresentam tempo de vida curto. Elas também se destacam pela maior intensidade de luz emitida, enquanto estrelas de baixa massa emitem menos energia em comprimentos de onda mais avermelhados.

Portanto, podemos concluir que uma região de formação estelar recente deve apresentar predominantemente radiação ultravioleta em seu espectro, indicando que essa região possui menos de $\tau \simeq 10^7$ anos. Aglomerados de estrelas que apresentam um espectro com intensidade máxima mais avermelhada indica que as estrelas massivas já finalizaram seu processo de queima de Hidrogênio e conseqüentemente assinalam que são mais velhas .

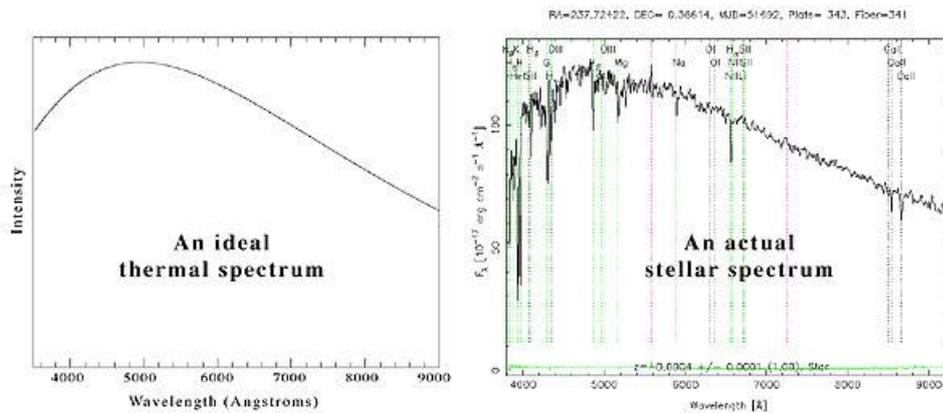


Figure 6.9: Comparação entre o espectro de um corpo negro e o espectro observado em uma estrela característica. A presença de linhas de absorção são resultado da interação de fótons advindos do núcleo com a atmosfera composta de gases frios

Missões	Objetivo	Tempo exposição (s)	Cobertura ($graus^2$)	Profundidade (m_{max})
Deep Imaging Survey (DIS)	Suporte para outros levantamentos	30000	80	20.5
Medium Imaging Survey (MIS)	Objetos SDSS	1500	1000	23.5
All-Sky Imaging Survey (AIS)	Universo Local	100	26000	25.0
Nearby Galaxy Survey (NGS)	Galáxias Próximas	1500	300	28.0
Calibration Survey (CAI)	Calibração	150000	5	25

Table 6.2: Informacoes sobre as missoes do telescopio GALEX

Levamos em consideração em nosso estudo galáxias anãs com formação estelar recente, portanto, para detectá-las é necessário coletar dados no ultravioleta. Por essa razão, nossa fonte de dados primária é o levantamento do GALEX.

6.7.1 GALEX

A missão *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX) foi o estudo de diversas galáxias na faixa espectral do ultravioleta utilizando o telescópio GALEX (Martin et al. (2005)), sob comando da *California Institute of Technology*. Iniciou a coleta de dados em 2003 e encerrou suas atividades em 2012. Possui como principal objetivo o estudo da formação e evolução de galáxias ao relacionar a emissão de radiação UV com propriedades intrínsecas de galáxias do Universo Local. Dos estudos fotométricos, 5 levantamentos foram realizados nas bandas de ultravioleta distante (*Far-UV*) e ultravioleta próximo (*Near-UV*), descritos na tabela 6.2.

Os dados obtidos foram disponibilizados em tempos discretos através de 7 *releases*. Além dos levantamentos descritos, entre 2005 e 2010, um terço do tempo disponível para observações foi utilizado para o *Guest Program* (GI) para atender pedidos de tempo da comunidade.

As bandas utilizadas no imageamento são descritas na tabela 6.4.

Table 6.3: Informações sobre as galáxias de cada par identificado.

Banda	$\Delta\lambda$ (Å)	λ_{eff}	Resolução angular	Ponto Zero
FUV	1350 - 1750	1528	4.0'	18.1
NUV	1750 - 2800	2271	5.6'	20.1

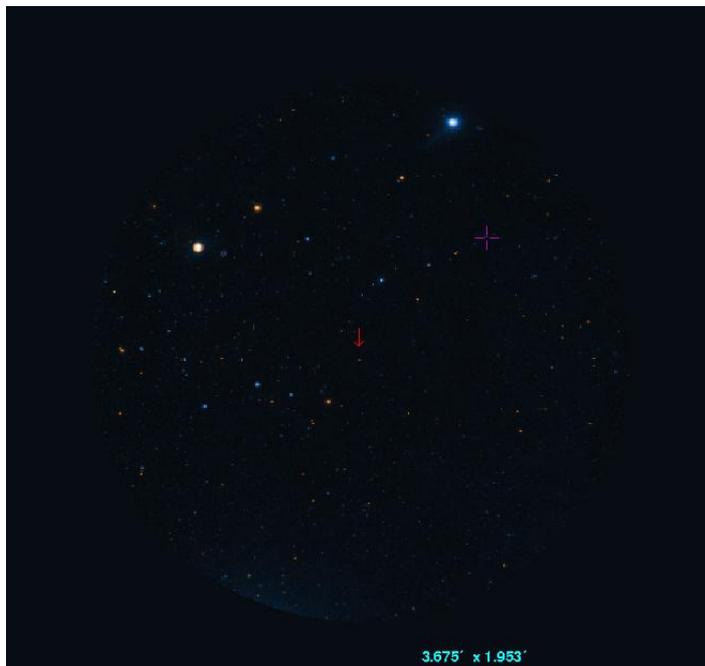
Table 6.4: Informações sobre as bandas espectrais disponíveis pelo GALEX e as suas respectivas imagens. Encontram-se apresentadas o intervalo de comprimento de onda capaz de ser detectado, juntamente com o comprimento de onda efetivo λ_{eff} . Com relação as imagens, apresentamos as resoluções angulares para das bandas NUV e FUV e o ponto zero para as magnitudes dos objetos detectados.

Figure 6.10: Composição das imagens FUV e NUV o par 1. A seta vermelha indica o centro da imagem e a cruz roxa representa a localização do par.

6.7.2 Vizinhança dos pares

Procuramos no banco de imagens do GALEX para as bandas FUV e NUV dos 16 pares pelo site do MAST^{||}. Como é possível ver na figura 6.10, a busca pelos pares não tem como saída uma imagem centrada no objeto. Portanto, necessitamos realizar um corte manual da imagem a partir de algum critério que definirá as dimensões da vizinhança a serem analisadas.

Trabalharemos apenas com uma imagem, para cada banda, que possua centro no par da interação e dimensões máximas que compreendam a vizinhança provável de conter produtos da interação. Para isso, levamos em consideração o tempo de vida de uma estrela massiva traçadora de regiões de formação estelar recente, com aproximadamente $\tau = 10^7$ anos. Além disso, estimamos uma velocidade de ejeção de $v = 10^3 \text{ Km} \cdot \text{s}^{-1}$. Assumindo velocidade constante, estimamos que possamos encontrar objetos dentro de um raio de aproximadamente

^{||}<http://galex.stsci.edu/galexview/>

Table 6.5: Informações sobre as galáxias de cada par identificado.

RA 1 (graus)	DEC 1 (graus)	Redshift 1	RA 2 (graus)	DEC 2 (graus)	Redshift 2	Sep. objetos (kpc)	Distância (Mpc)
151.4593	0.6325	0.0209	151.4611	0.6318	0.0212	5.7752	87.1045
170.5118	7.8131	0.0204	170.5097	7.8128	0.0202	6.1278	85.3360
171.4695	-0.6627	0.0187	171.4720	-0.6638	0.0187	7.3908	77.9160
27.5358	-9.3807	0.0181	27.5384	-9.3792	0.0180	7.8288	75.5082
194.7798	27.7701	0.0212	194.7785	27.7724	0.0208	8.1091	88.3536
184.6219	12.8009	0.0256	184.6236	12.8014	0.0243	6.3357	106.7614
194.5913	28.1504	0.0262	194.5923	28.1521	0.0222	7.1901	109.4910
214.1808	10.8833	0.0258	214.1815	10.8812	0.0268	8.27784	107.9043

250 kpc. Utilizando os cálculos de separação angular, e a resolução do GALEX equivalente a 5.6" na banda NUV, aplicamos uma rotina presente no *IRAF* de forma extrair um campo correspondente a um quadrado de 250 kpc por 250 kpc relativo a cada par.

O resultado da busca gerou um total de imagem de 13 pares. Porém, 5 pares possuíam imagens provenientes da missão *All-Sky Imaging Survey*, com tempo de exposição de 100 segundos. Por esse motivo, julgamos a resolução e qualidade das imagens desfavorável para as etapas seguintes. Portanto, obtivemos um total de apenas 8 pares, possuindo, cada um, uma imagem na banda FUV e uma imagem na banda NUV. Apesar da pequena quantidade de pares, decidimos manter a metodologia como teste nesses pares e futuramente, utilizando novos critérios de seleção da amostra, expandir tais procedimentos para uma amostra maior. As figuras 6.11 a 6.12 representam composições de cor para as imagens a serem trabalhadas e a tabela 6.5 possui as informações coletada até então dos pares.

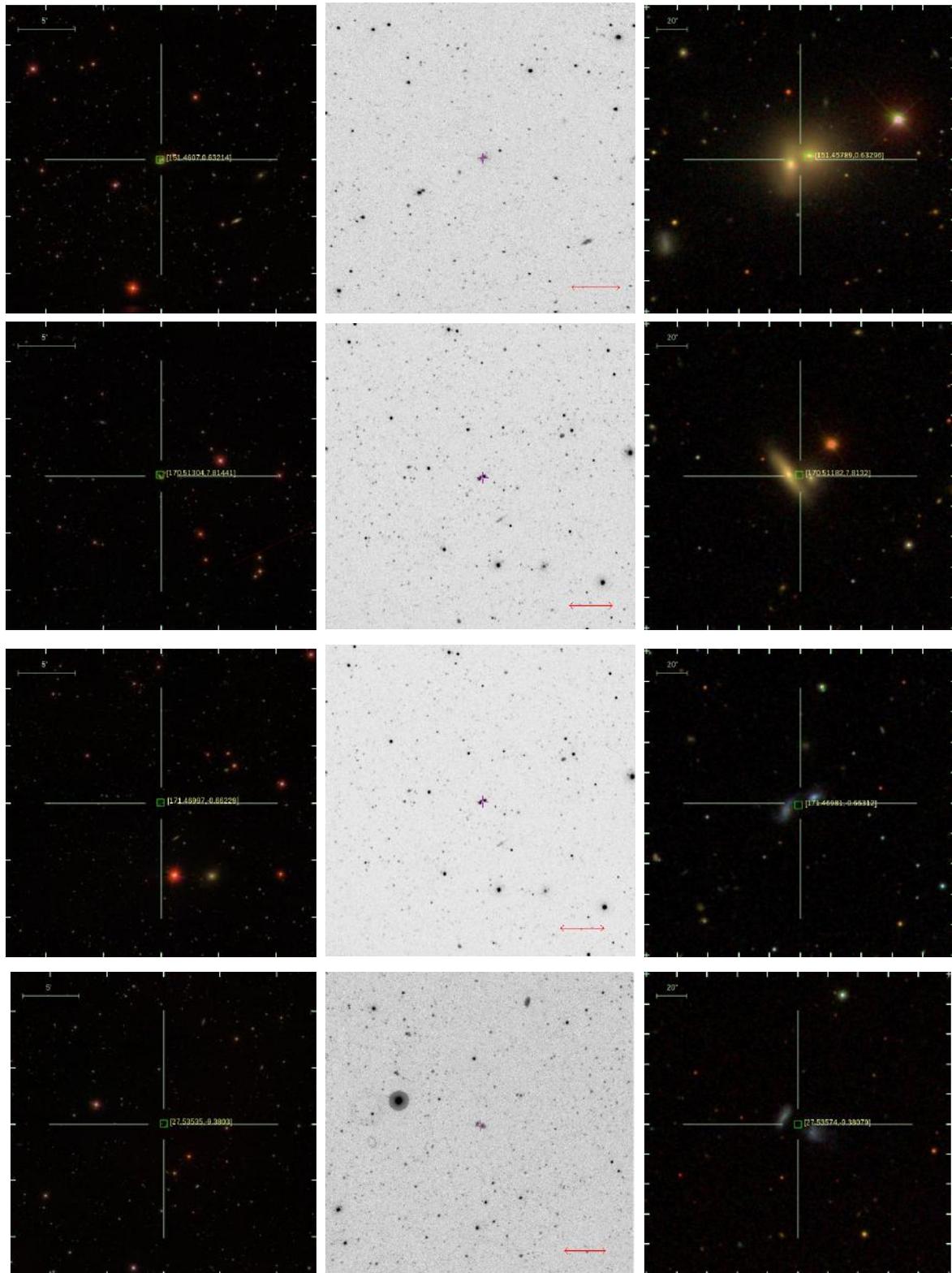


Figure 6.11: Campos dos pares 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A coluna esquerda apresenta os campos para as imagens do SDSS, a coluna central representa os campos para as imagens NUV do GALEX, o vetor vermelho duplo representa a distância angular de 1', e a coluna direita apresenta o par central segundo imagens do SDSS

6.8 SExtractor

Após transitarmos pelo processo de coleta de imagens e definição da vizinhança a ser estudada, iremos buscar meios de realizar a identificação de estruturas emissoras de radiação ultravioleta. A quantidade de luz emitida é quantificada no parâmetro de magnitude de um objeto, a partir da determinação do fluxo de energia coletado em uma missão observacional.

O banco de dados da missão GALEX dispõe da fotometria de objetos, porém realizadas de forma automática. Nosso estudo está baseado na localização de objetos de tamanho reduzido e fraca luminosidade, portanto é necessário realizar uma fotometria adaptada. Dessa forma, justifica-se a obtenção de imagens do GALEX e posterior detecção e fotometria de objetos realizados pelo programa SExtractor. Nesta seção iremos descrever sobre o modo de operação desse programa, reportar o trabalho realizado e discutir as dificuldades e limitações da metodologia perante ao tipo de ambiente no qual estamos interessados.

6.8.1 Funcionamento do programa

Source Extractor (SExtractor) (Bertin & Arnouts, 1996) é um programa cuja finalidade é permitir a detecção automática e fotometria de fontes em uma imagem em formato *fits*. Fornece, através de um processo automatizado, catálogos de objetos detectados com uma fotometria razoável.

A detecção de objetos é realizada a partir de um algoritmo descrito adiante. O princípio geral do programa consiste na identificação de um valor que caracteriza a contribuição do céu. Com base nesse valor, é imposto uma intensidade limite que definirá se um píxel pertence a um objeto ou não. Como saída, o programa gera um catálogo contendo cada objeto identificado com a medição dos respectivos parâmetros desejados.

A segmentação consiste no processo de identificação e separação de regiões de uma imagem com propriedades similares. No SExtractor, esse processo se traduz na separação entre fontes de radiação e o céu de uma imagem. Computacionalmente, um objeto caracteriza-se como um conjunto de píxels que excede um determinado limite imposto a partir do cálculo do valor do céu. Portanto, para realizar a identificação de objetos, é necessário inicialmente produzir um mapa do céu.

A definição de um valor para o céu ocorre com a tomada de uma área onde se é calculado o valor médio e o desvio padrão σ da distribuição de píxels. Os píxels que possuem os valores mais discrepantes (fora de 3σ da média) são descartados e a média e desvio padrão são calculados novamente. Esta interação ocorre até que os valores dos píxels restantes se encontram dentro de 3σ da média. Caso o desvio padrão diminua menos que 20% a cada interação, o campo é considerado “não populado”.

O valor final da contribuição do fundo será:

- média para o caso não populado
- $2.5 \cdot \text{mediana} - 1.5 \cdot \text{media}$, para o caso populado

O produto gerado é uma imagem contendo apenas as contribuições do céu, caso não houvesse nenhum objeto. Em uma imagem contendo fontes de emissão, os píxels referentes a um objeto astronômico são compostos das contribuições de intensidade do próprio objeto

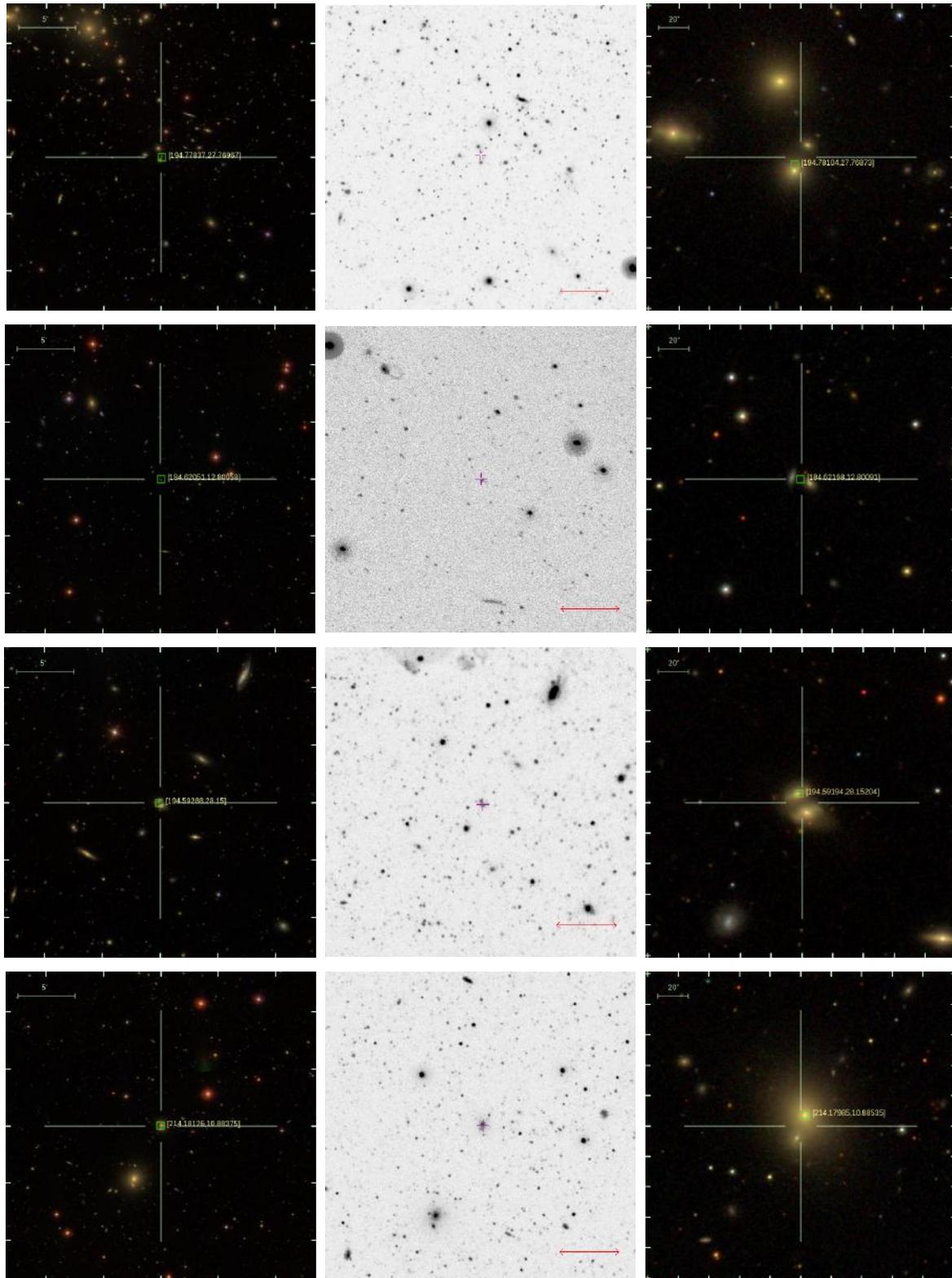


Figure 6.12: Campos dos pares 5, 6, 7 e 8, respectivamente. A coluna esquerda apresenta os campos para as imagens do SDSS, a coluna central representa os campos para as imagens NUV do GALEX, o vetor vermelho duplo representa a distância angular de $1'$, e a coluna direita apresenta o par central segundo imagens do SDSS

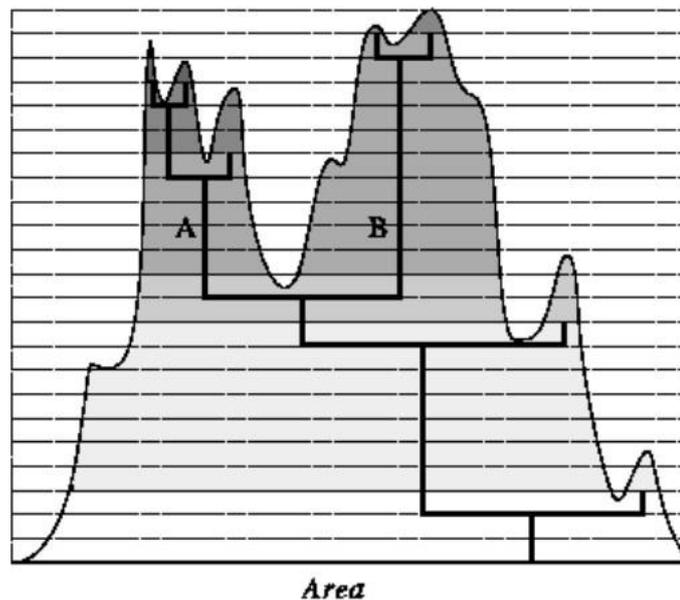


Figure 6.13: Exemplo de ramificação no processo de decisão de um conjunto de pixels adjacentes são um ou mais objetos

e das contribuições do ruído do céu. Portanto, caso não seja realizada a subtração desta última contribuição, as medidas podem não ser acuradas. Logo, é realizada a subtração deste mapa na imagem original de forma a gerar uma imagem produto que contenha apenas as contribuições dos candidatos a objetos.

Além da criação de um mapa de céu, é criado um *RMS-background-map*, referente ao ruído associado à imagem. Esse mapa é utilizado para determinação de incertezas das medições posteriores.

O próximo passo consiste em definir os critérios básicos para considerar um píxel pertencente a um objeto ou ao fundo. Como um objeto é definido como o conjunto de píxels agrupados que excedem o limite local, é necessário definir qual será este limite e qual o número de píxels mínimo adjacentes acima do limite para que o conjunto seja definido como um objeto. Esses valores são definidos na entrada do programa.

Caso dois objetos estejam muito próximos, o programa deve ter capacidade de identificá-los separadamente, evitando classificá-los como um único objeto. Para esse processo, são definidos níveis separados exponencialmente entre o limite de identificação de um objeto e a contagem máxima presente na imagem. Como é possível observar na figura 6.13, o gráfico faz um representação do algoritmo utilizado pelo SExtractor. O processo de ramificação procede de forma que uma ramo é criado quando duas regiões com intensidades acima de um nível são separadas por uma região com intensidade abaixo desse nível. Considera-se diferentes objetos de acordo com a fração de ramificações relativo a uma determinada ilha. Essa fração é definida na entrada do programa.

Definido os objeto, o próximo passo é finalmente a astronomia e fotometria dos objetos identificados. O arquivo de saída contém uma tabela onde cada linha se refere a um objeto seguido dos parâmetros especificados no entrada.



Figure 6.14: Ilustração de uma possível região anular para o cálculo local da contribuição de céu. Essa contribuição será extraída do objeto e posteriormente será realizada sua fotometria.

6.8.2 Aplicação do programa nas imagens

Para cada par de objeto, temos imagens para dois tipos de bandas diferentes: ultravioleta próximo (NUV) e ultravioleta distante (FUV). A radiação de um objeto pode possuir contribuições de intensidade discrepantes entre um filtro e outro. Um objeto que possui uma grande emissão no ultravioleta próximo não necessariamente possuirá substanciais contribuições no ultravioleta distante. Então, caso seja feita uma busca de objetos e respectiva fotometria em cada imagem separadamente, alguns objetos serão identificados pelo limite estabelecido na imagens da banda NUV mas não pelo limite na banda FUV.

A solução encontrada consiste em realizar a detecção e fotometria da banda NUV e realizar a fotometria na banda FUV a partir das posições encontradas no NUV com abertura fotométrica constante. Essa opção é disponibilizada pelo SExtractor. Os parâmetros requeridos na saída encontram-se descritos:

- Coordenadas equatoriais: ascensão reta (α) e declinação (δ).
- Magnitude com abertura de raio Kron (Kron (1980))
- Parâmetro CLASS_STAR - Utilizado para classificação de estrelas e galáxias.

6.8.3 Fotometria global x Fotometria local

A fim de nos familiarizarmos com a ferramenta, realizamos a fotometria utilizando a técnica de cálculo de céu global e local e comparamos as cores FUV - NUV.

Como descrito anteriormente, a detecção de um objeto se inicia com a tomada de uma região da imagem e o cálculo da média e desvio padrão da distribuição de intensidade dos pixels seguida de sucessivos descartes de pixels com intensidades discrepantes até que todos os valores da distribuição encontrem-se contidos em 3σ da média.

Para o cálculo fotométrico, é necessário extrair de cada objeto detectado o ruído associado ao céu. A principal diferença entre a fotometria local e global encontra-se no método de tomada desse valor do céu. Na fotometria global, o valor final do céu é o mesmo encontrado durante processo de detecção dos objetos. Para a fotometria local, após a detecção dos objetos, é calculado para cada astro o valor do céu em uma região anular centrada no objeto. Uma representação da região é observada na figura 6.14

Gil de Paz et al. (2007) reportou um estudo de galáxias próximas utilizando a missão NGS (*Nearby Galaxy Survey*). O pico de frequência de cores encontra-se em $FUV - NUV \simeq$

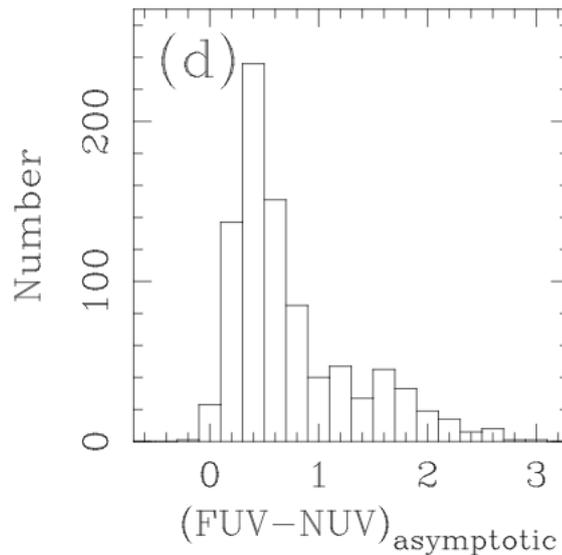


Figure 6.15: Gil de Paz et al. (2007) analisou a distribuição de cores para galáxias próximas ao Grupo Local disponíveis na missão *Nearby Galaxy Survey*. Podemos inferir pelo histograma que as galáxias permanecem majoritariamente próximas a $FUV - NUV \simeq 3\text{mag}$ com uma cauda atingindo valores próximos de 3 mag.

0.4mag (figura 6.15) com uma cauda se estendendo para cores mais avermelhadas até $FUV - NUV \simeq 3\text{mag}$. Portanto, utilizaremos esses valores de referência para a comparação de cores fruto do processo fotométrica local e global.

Finalmente, na figura 6.16, associamos as cores fotométricas calculadas de forma global e local. Há uma concordância de magnitude para a grande maioria dos objetos, mas é possível observar uma dispersão em alguns intervalos. Visando decidir qual é o melhor método, consideraremos apenas valores de $FUV - NUV \leq 2\text{ mag}$, pois representam valores típicos de galáxias. Em suma, as cores concordam pois encontram-se populando regiões próximas à reta $y = x$. Porém, é possível observar objetos cujos valores de cor são típicos na medida global mas são discrepantes para a medida local ($FUV - NUV)_{local} \leq 0$). Portanto, concluímos que a medida global possui melhor performance e a utilizamos como método base na fotometria.

Uma vez detectados os objetos com a metodologia discutida, passamos a classificá-los. Essa etapa foi muito sensível a separação de galáxias e estrelas, o que tornou a maior parte de nosso estudo. Desta forma, dedicamos o próximo capítulo a esse tema, em especial.

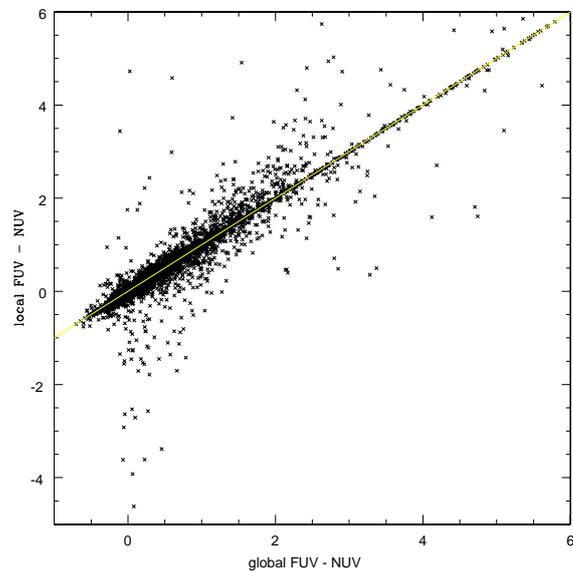


Figure 6.16: Correlação entre as cores FUV-NUV a partir da fotometria obtida por método global e local. Em suma, observamos uma concordância entre as medições, as cores obedecem uma relação linear. A partir de $FUV - NUV = 2$, diversos pontos demonstram uma elevada discrepância entre os dois métodos fotométricos. Seguimos a distribuição de Gil de Paz et al. (2007) analisando apenas regiões com cores abaixo de 2. Identificamos dispersão

Chapter 7

Classificação de fontes detectadas

No capítulo anterior, descrevemos todo o processo de escolha de uma amostra de galáxias em processo de colisão. Baseando-se no banco de dados do *Sloan Digital Sky Survey*, desenvolvemos critérios para selecionarmos galáxias em interação, cujas vizinhanças apresentem a possibilidade observacional de conterem objetos fruto da interação, ou de origem anterior a formação da cada galáxia quando em isolamento.

A localização de galáxias anãs com formação estelar recente ao redor de pares foi ministrada manuseando o programa SExtractor. Apresentamos uma descrição do funcionamento do programa e relatamos as decisões sobre os critérios internos de entrada para a realização da fotometria.

Neste capítulo, relataremos os resultados da rodagem sobre as imagens nas bandas NUV e FUV. Neste capítulo, notaremos que o programa não determina uma separação satisfatória entre os tipos de fontes identificados. Expomos a busca por métodos alternativos para a classificação dos pequenos objetos emissores de radiação UV. É importante ressaltar que esse procedimento foi o mais trabalhoso e nos tomou a maior parte do tempo de projeto para executá-lo.

7.1 Classificação entre estrelas e galáxias

O programa SExtractor dispõe de um algoritmo classificador de objetos baseado em redes neurais como parte de suas configurações básicas. Uma rede neural artificial caracteriza-se como um conjunto de métodos computacionais inspirados na estruturação de sistemas nervosos de organismos inteligentes. É composta de unidades de processamento e sua maior importância encontra-se na capacidade de aprendizado a partir de exemplificações de padrões.

A rede pertencente ao SExtractor foi exposta a um processo de aprendizado supervisionado, sendo treinada a identificar galáxias ou estrelas a partir de imagens artificiais desses objetos. O parâmetro de saída, o qual lidamos na prática, é denominado CLASS_STAR e possui valor entre 0 e 1. Valores próximos a 0 indicam que o objeto possui formato extenso, sendo provável de ser uma galáxia, enquanto valores próximos a 1 representam objetos

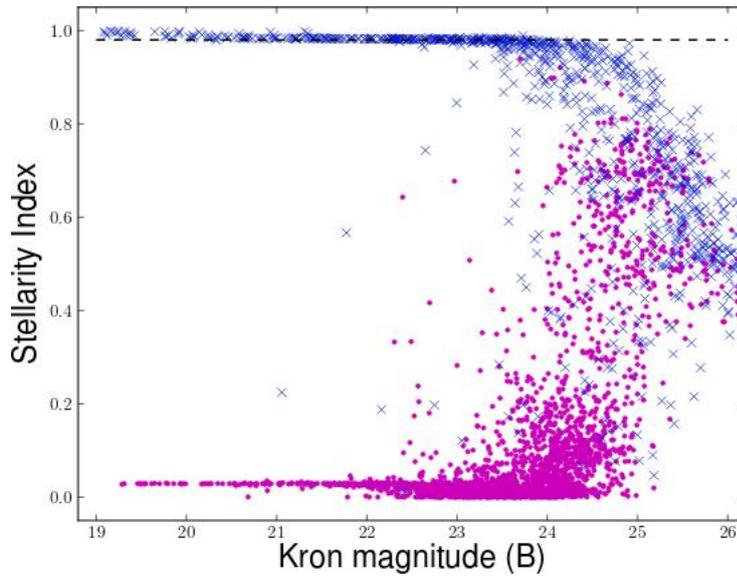


Figure 7.1: Annunziatella et al. (2013), simulando galáxias e estrelas em um mesmo campo, testou a performance do programa SExtractor em relação a diferenciação entre objetos. Pontos em azuis em formato x representam estrelas e pontos rosas representam galáxias. Podemos notar que a classificação é fiel para pequenas magnitudes, porém, à medida que a magnitude cresce, a classificação torna-se cada vez menos acurada.

com forma aproximadamente pontual, sendo portanto possíveis estrelas. Porém, como é possível notar, o intervalo é contínuo e a maior parte dos objetos encontram-se em valores intermediários.

Em trabalhos que envolvem o uso do SExtractor, a análise de parâmetro CLASS_STAR se dá pela escolha de um valor de transição C onde:

$$classificacao = \begin{cases} galaxia, & \text{se } 0 \leq x < C \\ estrela, & \text{se } C < x \leq 1. \end{cases} \quad (7.1)$$

C deve ser estimado pela relação entre CLASS_STAR e a magnitude encontrada como na figura 7.1. Annunziatella et al. (2013) comparou a performance de alguns programas de detecção de imagens similares ao SExtractor, incluindo-o. Na figura observamos uma correlação entre o parâmetro classificador e a magnitude B a partir de objetos simulados pelos autores de uma imagem populada. Os pontos rosas representam galáxias e os pontos no formato cruzado azuis representam estrelas.

O processo de escolha baseia-se simplesmente na decisão de um valor de CLASS_STAR que separará a parte superior do gráfico em estrelas e a parte inferior em galáxias, após uma inspeção visual da distribuição de pontos no gráfico. É evidente que esse tipo de julgamento é afetado por alguns fatores, expostos à seguir.

Devemos optar entre ter uma amostra final com baixa contaminação, mas com perda substancial de galáxia ou uma amostra final com um grande número de galáxia mas com alto grau de contaminação. Além disso, é possível notar que o grau de confiabilidade do parâmetro classificador diminui à medida que a magnitude torna-se maior. No gráfico, a partir da magnitude 23, notamos uma classificação cada vez mais turva pela elevada superposição de estrelas e galáxias para valores de CLASS_STAR similares.

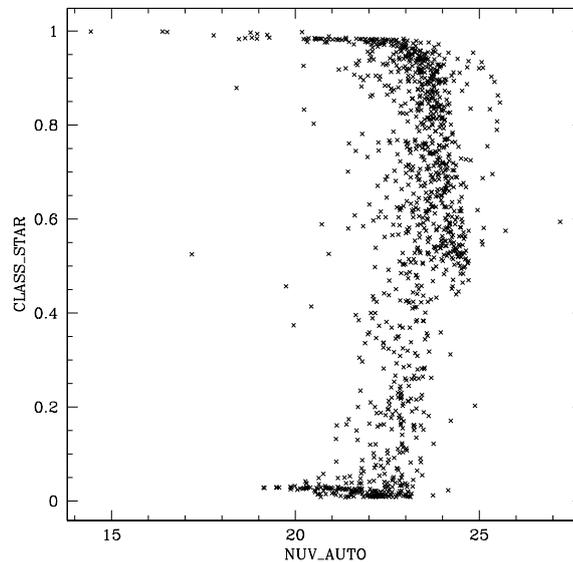


Figure 7.2: Relação entre o parâmetro classificador e a magnitude NUV do par 5. Os outros pares mostram distribuições semelhantes. Não observamos duas aglomerações discrepantes que nos permita escolher um valor de separação confiável.

No caso de nosso estudo, estamos em busca de objetos de difícil detecção por sua reduzida extensão e fraca magnitude. Portanto, possivelmente nossos objetos encontram-se nas regiões de classificação ambígua. A figura 7.2 exemplifica a distribuição NUV e do índice classificador no par 5. Esse caso é representativo pois os outros pares apresentam distribuições semelhantes. É possível notar que não existe uma separação clara entre os objetos que nos garanta que as galáxias anãs que buscamos estejam contidas dentro de uma classificação específica.

Outro parâmetro alarmante encontra-se na figura 7.3. Também representado o caso do par 5, relacionamos o parâmetro classificador dos objetos detectados pela imagem NUV e o cálculo do mesmo parâmetro para a imagem FUV. Não existe uma linearidade entre os parâmetros, levando-nos a concluir que sua utilização única e exclusiva põe em risco a localização das galáxias desejadas.

Dada todas as ponderações realizadas nesta seção, optamos por descartar a classificação disponibilizada pelo SExtractor e investigar técnicas alternativas de classificação adaptadas ao nosso conjunto de objetos. Assim, garantiremos que o máximo de galáxias anãs sejam incluídas na amostra de objeto final.

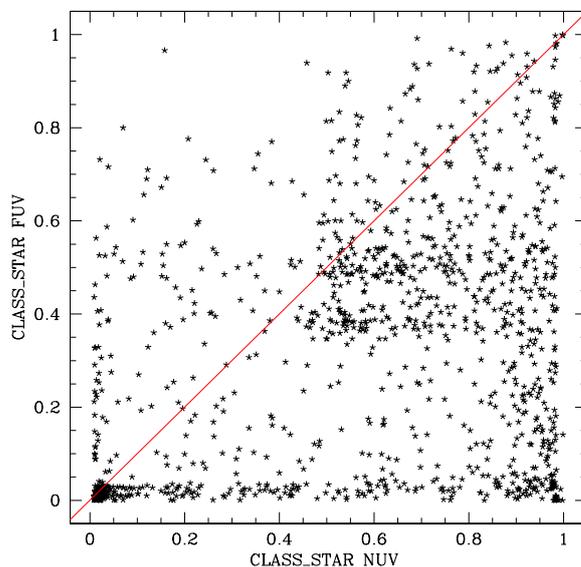


Figure 7.3: Relação entre o parâmetro classificador produto da imagem NUV e da imagem FUV. Não observamos uma linearidade entre os parâmetros, mostrando-nos que CLASS_STAR não representa um bom fator para classificar nossos objetos.

7.2 Correlação entre SDSS e SExtractor

Como primeira tentativa, iremos atribuir aos objetos detectados pelo SExtractor os valores de magnitude nas bandas *ugriz* disponíveis no banco de dados do SDSS. Uma maior abrangência de contribuições de radiação em diferentes intervalos espectrais pode nos destacar diferenças de cores para galáxias e estrelas que não se mostraram evidentes para as magnitudes no ultravioleta. Além disso, esses parâmetros extras serão úteis na análise posterior dos objetos definidos ao redor dos pares.

Como discutido na fase de testes do projeto BIDHU, para acessar o banco de dados do SDSS, realizamos uma pesquisa no site *SkyServer* utilizando a linguagem SQL. Na busca, devemos identificar as porções do céu das quais extrairemos os objetos e respectivas magnitudes. Portanto, para cada par, registramos as ascensões e declinações máximas e mínimas que identificam as vizinhanças a serem analisadas. Esses intervalos serão parâmetros de entrada na busca para que o SDSS nos dê como saída apenas objetos nessas regiões.

A tabela utilizada foi *PhotoPrimary*, sendo uma subtabela da *PhotoAllObj*, e o código de busca encontra-se abaixo:

```
SELECT
```

```

ra, dec, u, err_u, g, err_g, r, err_r, i, err_i, z, err_z

FROM PhotoPrimary

WHERE

    ra BETWEEN ra_min AND ra_max
    AND dec BETWEEN dec_min AND dec_max

```

O resultado de saída do SDSS é uma tabela contendo todos os objetos detectados pelo levantamento, dentro do campo estabelecido, com suas respectivas magnitudes e erros associados a cada uma. Naturalmente, o número de objetos da tabela do *Sloan* é maior que o número de objetos da tabela do GALEX, graças a maior variedade de filtros.

O próximo passo consiste de um cruzamento entre os dois catálogos. Em cada um, dispomos da coordenadas equatoriais dos alvos e estes serão os parâmetros base para a unificação das tabelas. O mecanismo de localização de um mesmo objeto acontece com o cálculo das separações angulares entre os objetos dos dois catálogos. Em código *Python*, calculamos para cada objeto do catálogo do SExtractor as separações angulares deste com os objetos do catálogo do SDSS. Associamos as informações das duas tabelas a um mesmo objeto quando a distância angular é inferior a 2". No fim do processo, é gerada uma tabela unificadora contendo as coordenadas equatoriais, as magnitudes FUV, NUV, u, g, r, i e z e os respectivos erros de cada magnitude. Na tabela 7.1, temos um resumo dos números da correlação final.

Table 7.1: Resultado da correlação entre os catálogos do SExtractor e SDSS

Par	Nº objetos SDSS	Nº objetos SExtractor	Nº final
1	2702	465	392
2	2765	389	345
3	4186	637	563
4	1054	525	447
5	2652	1190	786
6	1445	155	129
7	1497	711	441
8	1953	684	518

7.3 Classificação cruzada

A classificação proposta pelo programa SExtractor não é suficiente para a diferenciação entre tipos de objetos para o caso estudado. Para fracas magnitudes, o parâmetro classificador se torna ambíguo, e não há uma concordância entre o parâmetro de saída para a banda

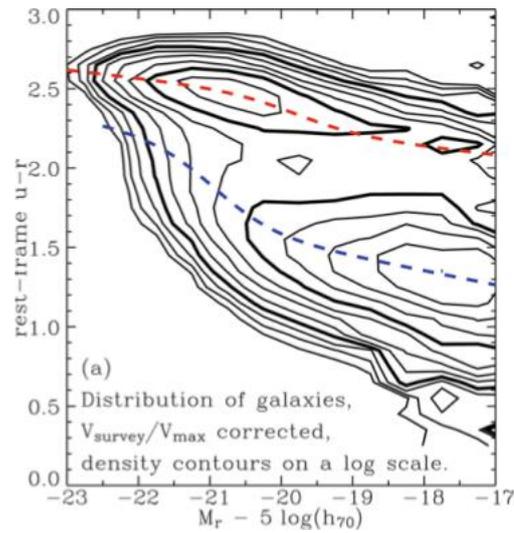


Figure 7.4: Temos a representação em um diagrama cor-magnitude de 70000 galáxias do SDSS produzido por Baldry et al. (2004). Observamos duas modas nas curvas de nível nos indicando que existem duas populações diferentes em na amostra.

NUV e para a banda FUV. Portanto, estamos interessados em buscar na literatura métodos alternativos de classificação.

Um método muito utilizado na classificação de galáxias é a separação pelo diagrama cor-magnitude. Uma cor define-se como a diferença de magnitude entre duas diferentes bandas. A definição de magnitude nos permite concluir que uma cor nos dá informação sobre a razão de fluxos entre objetos em diferentes faixas de comprimento de onda. A vantagem de seu uso se dá no fato de que, como uma cor é independente da distância ao objeto, a comparação de cores para diferentes objetos nos permite inferir propriedades intrínsecas das diferentes classificações existentes.

As propriedades intrínsecas e diferentes processos físicos permitem que objetos de semelhantes tipos tenham cores intrínsecas similares. Um caso conhecido em extragaláctica é a bimodalidade existente em diagramas cor-magnitude. Galáxias espirais possuem a maior parte da contribuição de energia do seu espectro na faixa do azul devido a alta taxa de formação estelar. Galáxias elípticas possuem população estelar antiga, predominantemente formada de estrelas de baixa massa o que gera uma contribuição avermelhada ao espectro. Ao analisar diagramas cor-magnitude similares ao da figura 7.4, observamos duas aglomerações de pontos indicando uma bimodalidade. Na figura, está representado um conjunto de 70000 galáxias do SDSS no intervalo de *redshift* $0.01 \leq z \leq 0.08$ coletadas por Baldry et al. (2004). A cor representa $u - r$ com uma correção de *redshift* aplicada para cada objeto, e está graficada em função da magnitude absoluta em r . As curvas sólidas representam densidades de contorno numéricas. Associamos ao pico presente em $u - r \sim 2.5$ e $M_r \sim -1$ à população de galáxias elípticas e ao pico presente em $u - r \sim 1.3$ e $M_r \sim -18.5$ à população de galáxias espirais. Portanto, esse fenômeno é uma interessante ferramenta classificatória de tipos morfológicos de um conjunto de objetos.

O mesmo princípio pode ser adotado para a diferenciação de galáxias e estrelas. Portanto, a combinação de cores específicas que realçam propriedades de cada objeto é uma ferramenta interessante para o problema em questão. Buscamos na literatura a análise de

diferentes objetos pelos suas cores intrínsecas associadas aos levantamentos GALEX e SDSS. Ao comparar com nossos objetos, buscamos definir intervalos de cores típicas para galáxias, a fim de finalmente identificarmos o que são galáxias e o que são estrelas.

Bianchi et al. (2007) realizou uma interessante análise para os objetos que possuem fotometria disponível nos levantamentos SDSS e GALEX. O trabalho usou os dados fotométricos do *Data Release 3* do *Sloan Digital Sky Survey* e do *Galex Release 1* referente as missões *All-Sky Imaging Survey (AIS)* e *Medium Imaging Survey (MIS)* do telescópio espacial GALEX. Para campos observados em ambos os levantamentos, foi realizado uma combinação utilizando o critério de seleção de 4". Limpezas na amostra referentes à eliminação de objetos espúrios e de múltipla entradas para o mesmo objeto foram realizadas. Diversas análises estatísticas foram ministradas, porém, nosso foco de interesse está no diagrama de cores e modelagem de cor.

Diversas modelagens de cores foram utilizadas para estrelas, galáxias e especificamente QSOs. Modelos de cor foram calculados ao aplicar as curvas de transmissão de filtros do GALEX e SDSS a espectros teóricos e *templates* de objetos astrofísicos diferentes. Cada modelo espectral sofreu um determinado tipo de avermelhamento devido a extinção galáctica.

A figura 7.5 mostra os diagramas de cor para as combinações $[FUV-g]$ vs $[g-i]$, $[NUV-g]$ vs $[g-i]$, $[FUV-NUV]$ vs $[g-r]$ e $[FUV-NUV]$ vs $[NUV-r]$ para fontes com erros fotométricos menores do que 0.15 mag para a banda FUV e 0.10 mag para banda NUV. Tendo como base a classificação disponível pelo SDSS, os pontos azuis representam as fontes pontuais e os pontos pretos representam fontes extensas. Os modelos de cor são mostrados com diferentes símbolos e cores, sendo identificado na legenda dos gráficos. Os efeitos de avermelhamento aplicados são mostrados por linhas conectando o modelo de cor intrínseco ao modelo de cor avermelhado. O artigo ressalta que a modelagem se encaixa muito bem com as propriedades observadas para cada classe representada.

Nosso procedimento inicial se desenvolveu com a identificação das regiões no gráfico populadas por galáxias e o registro dos intervalos de cor que as contém. O resultado desse procedimento é explicitado abaixo.

- $FUV - g$ vs $g - i$: $0.6 < g - i < 1.8$ e $0 < FUV - g < 3$ ou $0.7 < g - i < 1.8$ e $FUV - g > 3$
- $NUV - g$ vs $g - i$: $0.5 < g - i < 1.8$ e $0 < NUV - g < 2.5$ ou $0.9 < g - i < 1.8$ e $FUV - g > 2.5$
- $FUV - NUV$ vs $g - r$: $0.5 < FUV - NUV$ e $g - r > 0.2$ ou $0.5 < FUV - NUV < 0.9$ e $g - r > 0.3$ ou $FUV - NUV > 1$ e $g - r > 0.5$
- $FUV - NUV$ vs $NUV - r$: $0.4 < FUV - NUV$ e $NUV - r > 1$ ou $0.1 < FUV - NUV < 1.5$ e $NUV - r > 1.5$

Dispondo de tais regiões de cores típicas, sugerimos que, para cada par, os objetos identificados em suas redondezas seriam classificados como galáxias e os pontos fora desses intervalos seriam descartados pois classificá-los como estrelas. Não é necessário realizar nenhum tipo de correção de avermelhamento pois este processo não foi realizado na amostragem de Bianchi et al. (2007). A tabela 7.2 mostra o resultado da seleção segundo os critérios acima. O número de galáxias encontradas em todos os casos é inferior a 50%. Pelo fato de que

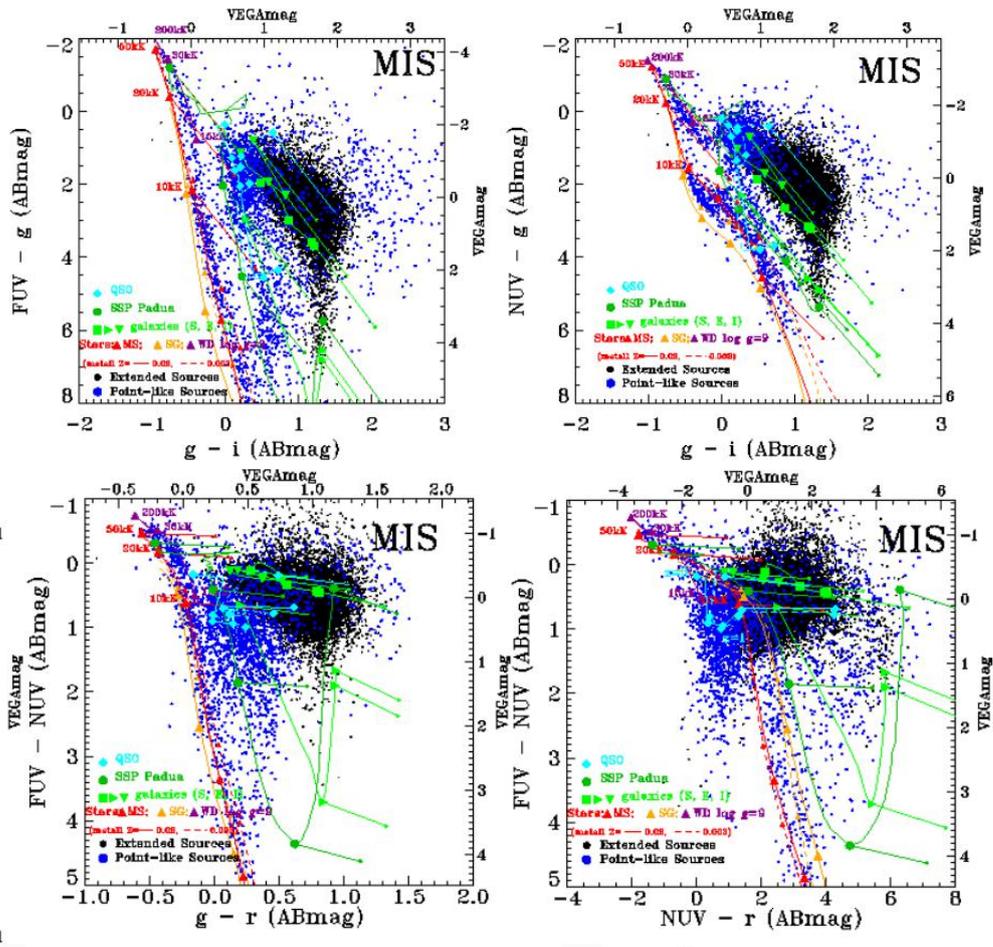


Figure 7.5: Diagramas cor-cor resultado do cruzamento de objetos de Bianchi et al, 2007. Os pontos são assinalados segundo a classificação resultante do Sloan. Pontos azuis indicam objetos pontuais e pontos pretos indicam objetos extensos. Os modelos de cor estão assinalados por símbolos de diferentes cores, os modelos são citados na legenda do gráfico. Apenas estão presentes os objetos com erros fotométricos menores que 0.15 mag (0.10 mag) na banda FUV (NUV)

estrelas massivas possuem um curto tempo de vida ($\tau \simeq 10^7$ anos) e estão geralmente associadas a regiões de formação estelar recente, é esperado que o número de galáxias detectados pelo GALEX será maior do que o número de estrelas no campo. Portanto, concluímos que este método de classificação não foi sensível o suficiente para determinar uma confiável classificação entre os objetos.

7.4 Classificação estrutural e empírica

A classificação apresentada por Bianchi et al. (2007) se mostrou insuficiente para determinar a classe dos objetos de nosso catálogo. A delimitação de intervalos de cores intrínsecas não se fez satisfatória segundo nossa suposição de que a maior parte dos objetos detectados são galáxias. Buscamos novamente novas propriedades associadas à galáxias anãs que permitam ser identificadas em nossa amostra.

Nossa nova abordagem consiste de realizar uma nova rodagem do programa SExtractor

Table 7.2: Resultado da classificação de nossa amostra segundo a classificação de Bianchi et al. (2007).

Par	Nº Match	Nº galáxias
1	392	109
2	345	86
3	563	224
4	447	165
5	786	234
6	129	51
7	441	133
8	518	186

em nossas imagens, acoplado com o programa PSFex que, como será descrito à seguir, nos fornece novos parâmetros para a diferenciação de entrelas e galáxias. Além disso, para uma classificação mais acurada, utilizamos uma amostra de referência de galáxias STARBURST do *Sloan* para executar uma correção de cor empírica e consequente limpeza de nossos objetos os quais não seguem a mesma distribuição estatística da amostra de referência.

Inicialmente, realizamos uma limpeza estrutural em nossa amostra com uma retomada ao parâmetro de classificação do SExtractor. Como discutido anteriormente, colocamos em cheque o uso exclusivo do CLASS_STAR pois nossos objetos encontram-se em regimes de altas magnitudes e não desejamos ter uma grande perda de galáxias como resultado de uma eliminação de contaminações. Portanto, decidimos adotar um valor conservador de CLASS_STAR < 0.9 para considerarmos como uma galáxia. Logo, descartamos os objetos com alto valor de CLASS_STAR pois a probabilidade destes objetos serem extensos é baixa.

O segundo critério para a limpeza estrutural do catálogo está relacionado a associação entre o programa PSFex (Bertin (2011)) e SExtractor. O programa SExtractor possui um padrão interno de cálculo da *point spread function*, ou função de espalhamento de ponto, no qual nos baseamos inicialmente. A PSF é uma imagem na qual um objeto, que deveria se mostrar pontual, apresenta um espalhamento de seu brilho. A função de espalhamento matematicamente pode ser representada como uma função bidimensional da distribuição de luz típica de uma imagem. A grandeza desse fenômeno de espalhamento é uma medida de qualidade do sistema ótico incluindo o efeito da atmosfera.

O espalhamento observado pode ser fruto de diferentes fenômenos. Para telescópios terrestres, a luz proveniente de um astro sofre uma série de refrações ao longo das camadas da atmosfera em diferentes densidades. Além disso, soma-se às causas o fenômeno de difração pela passagem da luz por uma fenda (abertura do telescópio). Para os telescópios espaciais, apenas está relacionado o último fenômeno descrito.

Uma das consequências desse espalhamento é o fato de que todos os objetos de uma determinada imagem, até mesmo os extensos, sofrem um grau de embaciamento, o que exige uma correção. Portanto, é fundamental no processo de redução de imagens uma boa modelagem dessa função.

A proposta do programa PSFex é, combinado ao SExtractor, realizar uma modelagem

de *point spread function* que será posteriormente utilizada como parâmetro inicial para o SExtractor executar uma fotometria mais confiável. Essa abordagem permite inferir algumas estimativas sobre as magnitudes e, sob nosso interesse, permite uma classificação mais acurada. Descrevamos como alcançamos tal classificação.

Primeiramente, operamos o SExtractor nas imagens a partir de suas configurações padrões, o que inclui a realização do cálculo da função de espalhamento baseados nos parâmetros internos originais. Porém, é necessário especificar que um dos produtos de saída deve conter a criação de subimagens de cada objeto detectado denominados como *vignettes*. Além dessas imagens, os seguintes parâmetros de saída são requeridos:

- Coordenadas do centroide de cada objeto
- *Half-light radius* ou raio efetivo - raio no qual metade da luz total da galáxia encontra-se emitido.
- Razão sinal-ruído
- Fluxo medido em uma determinada abertura
- Incerteza do Fluxo
- Elongação do objeto - aparente afastamento angular de um astro em relação a um ponto ou a um sistema fixo
- Flags de extração

Com o fim da operação preliminar do SExtractor, utilizamos o programa PSFex para a modelagem da PSF. Inicialmente, a PSFex seleciona as subimagens que possuem uma grande probabilidade de serem fontes pontuais, segundo critérios relativos ao raio efetivo e elipticidade. Para cada candidato, são guardados em memória sua imagem *vignette* e um vetor contendo um conjunto de parâmetros nos quais o modelo de PSF dependerá explicitamente.

A modelagem da função de espalhamento acontece em seguidas iterações compostas de ajustes na função até que apresente concordância satisfatória com as fontes pontuais extraídas da primeira rodagem do SExtractor. Os modelos são salvos na memória juntamente com os arquivos de diagnóstico. O passo final é definido com uma extração pelo SExtractor utilizando como função de espalhamento o modelo produzido pela PSFex.

Em nosso estudo, as principais vantagens de se utilizar a combinação SExtractor + PSFex são representadas na figura 7.6. Annunziatella et al. (2012) demonstra algumas relações entre parâmetros de saída capazes de realizar uma diferenciação entre objetos a partir de uma lista de estrelas e galáxias simuladas.

Como discutida anteriormente, o painel **a** representa a relação entre a magnitude para abertura de Kron na banda B e o parâmetro de classificação CLASS_STAR. Para este caso, utilizamos a classificação $CLASS_STAR < 0.9$. O painel **b** representa a relação entre a na banda B com o raio efetivo de um objeto, que caracteriza-se como o raio no qual está contido metade da luz total emitida pelo objeto. Notamos que as estrelas permanecem na porção inferior da população distribuídas principalmente em $r_e = 2$. No painel **c**, relacionada a magnitude Kron como brilho superficial por magnitude que define-se como fluxo por unidade de área. As estrelas nesse caso apresentam uma distribuição linear entre os parâmetros. Finalmente, o painel **d** relaciona a magnitude Kron com o parâmetro exclusivamente gerado

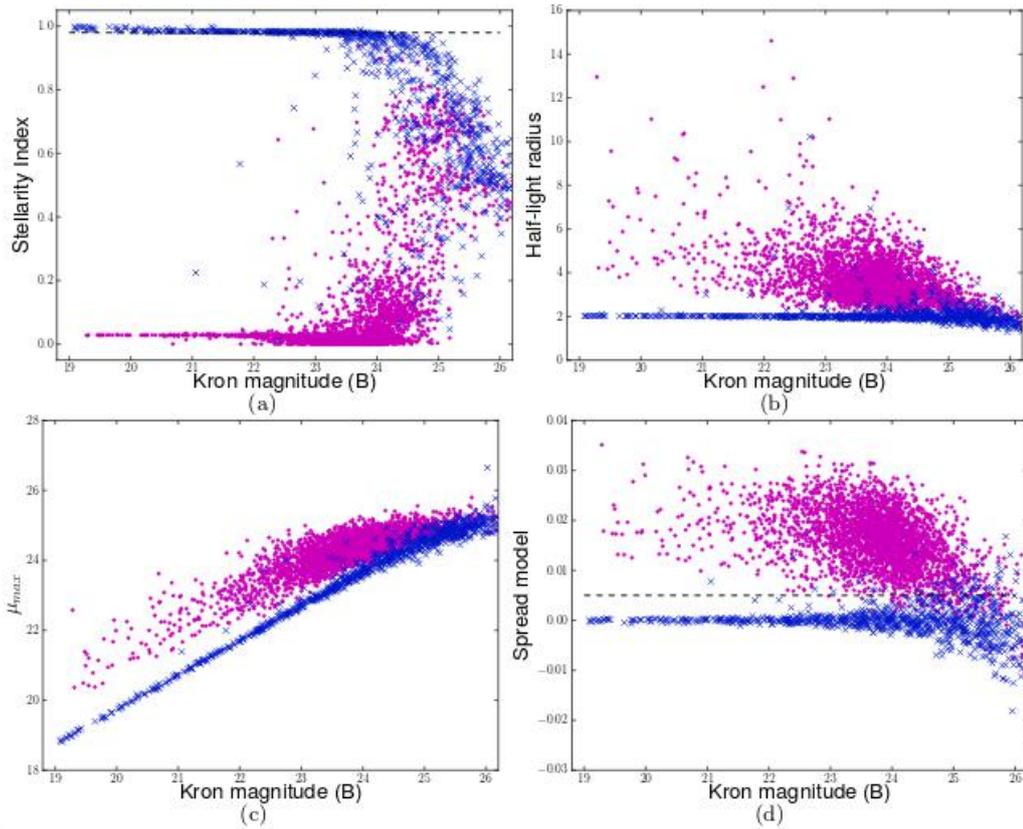


Figure 7.6: Annunziatella et al, 2012 simulou uma lista de objetos compostos de estrelas e galáxias e realizou o procedimento de fotometria com as rotinas mais populares em astronomia. No caso da combinação SExtractor+PSFex, 4 diferentes abordagens tornam possível a classificação entre objetos. A relação da magnitude com abertura Kron com o parâmetro *CLASS_STAR* (painel a), *half-light radius* (painel b), μ_{max} (panel c) ou *spread model* (painel d) permitem distinguir estrelas (cruz azul) de galáxias (pontos roxos)

pelo programa PSFex. O parâmetro *Spread Model* caracteriza-se como um discriminante linear normalizado entre o melhor ajuste local de PSF e um modelo mais extenso feito pela mesma PSF convoluido com um modelo de disco circular exponencial (Desai et al. 2012). Nota-se que esses gráficos são boas ferramentas discriminatórias.

Operamos todos os passos descritos acima e os resultados podem ser conferidos na figura 7.7, onde se encontram todas as detecções de todos os 8 pares. De acordo com nossa análise, realizamos a eliminação de objetos por critérios conservadores sobre o brilho superficial e o parâmetro *spread model*. A correlação do raio efetivo e a magnitude NUV mostra que a maioria dos objetos encontram-se na região transitória entre a classificação de estrelas e galáxias, portanto não definimos um valor limite para essa correlação.

Para o brilho superficial, observamos na figura 7.6 que, para objetos com magnitude $m_B < 22$, existe uma proeminente separação entre estrelas e galáxias. No caso de nossos objetos detectados, essa separação ocorre até a magnitude $NUV = 21$. De fato, poucos objetos se localizam nas regiões destinadas as galáxias, portanto, decidimos como brilho superficial excludente $\mu < 24$. Para objetos com valores de brilho superficial superiores, observamos uma dificultosa diferenciação, portanto, não manifestamos critério para esse regime.

Para o parâmetro *spread model*, ao compararmos com os resultados de Annunziatella et

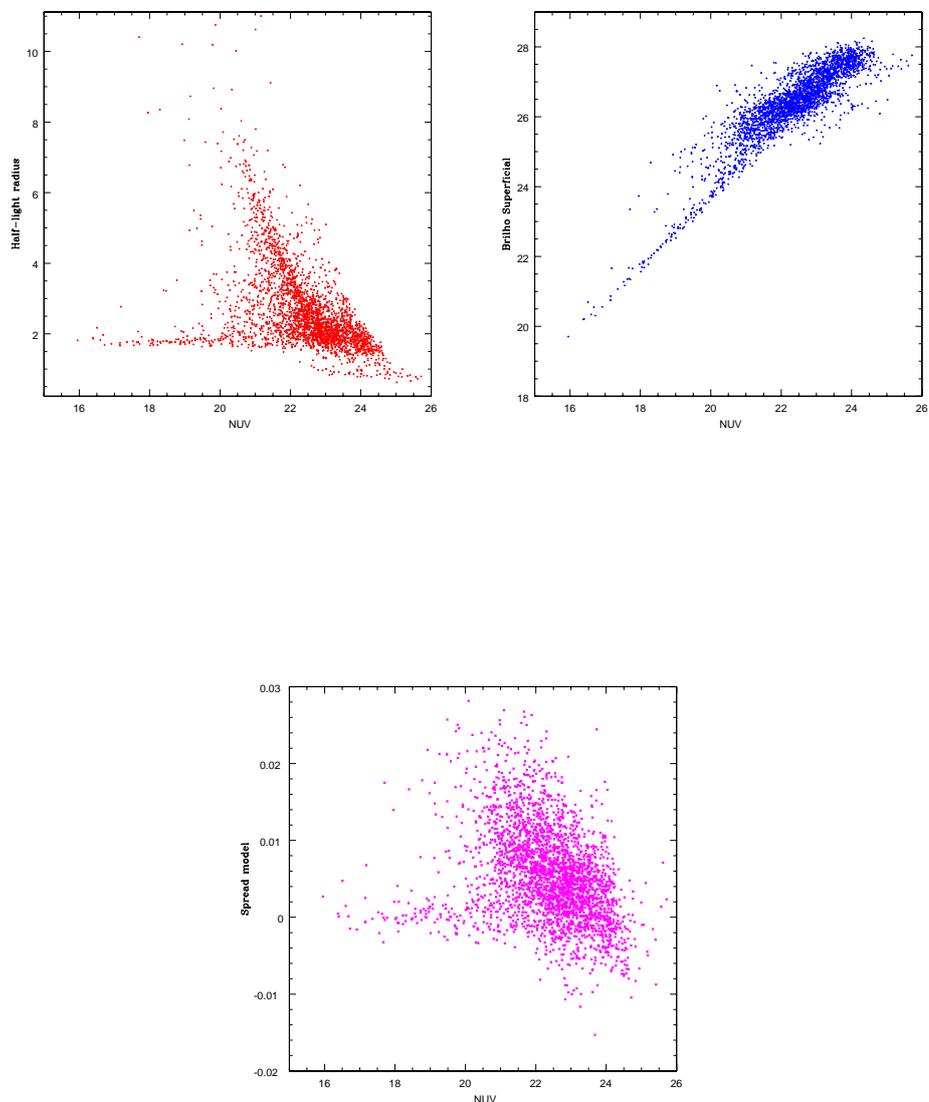


Figure 7.7: Seguindo a análise de Annunziatella et al., produzimos as relações entre a magnitude NUV com, respectivamente, o raio eficiente, o brilho superficial e o parâmetro *spread model*. Nos gráficos encontram-se representados dos objetos detectados dos 8 pares. Somos capazes de estabelecer critérios para eliminação de estrelas.

al., adotamos o critério conservador excludente de $spreadmodel < 0$. Novamente, grande parte dos objetos estão nas regiões transitórias, o que exige uma análise mais cuidadosa.

De forma sucinta, a etapa estrutural emite critérios de estrelas tendo $CLASS_STAR \geq 0.9$, $\mu_{max} < 24$, $spreadmodel < 0$. Como foi possível observar, ao adotar critérios conservadores, não fomos capazes de diferenciar eficientemente os objetos em suas classificações usuais. Portanto, nós adotaremos uma segunda abordagem para, finalmente, obtermos uma

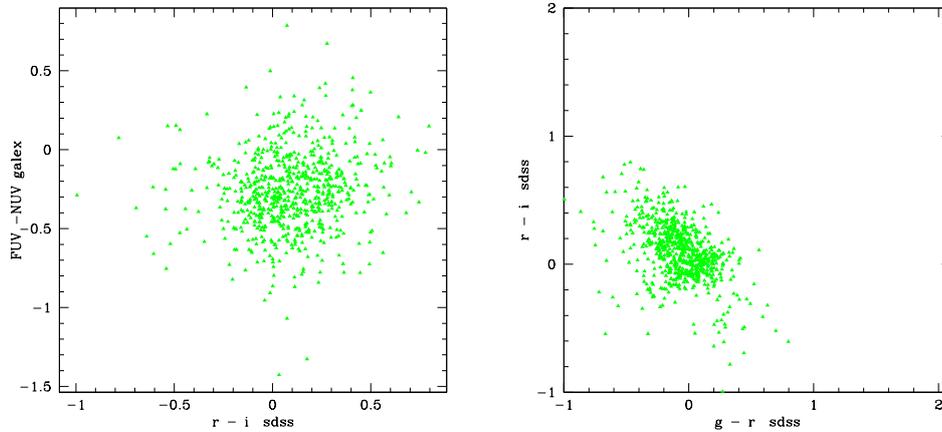


Figure 7.8: Nuvem de cores dos objetos da amostra de referência do SDSS.

amostra de objetos extensos com proeminente formação estelar, para o teste de nossa hipótese.

A segunda, e última, etapa foi atingida ao se assumir que as galáxias do campo possuem cores intrínsecas típicas de galáxias anãs em formação estelar. Comparamos as cores de nossos objetos às cores de uma amostra de galáxias *starforming* com fotometria disponível no SDSS.

A construção da amostra se iniciou com uma seleção pelo *Data Release 10* do SDSS de galáxias classificadas como *STARFORMING*, a partir do diagrama BPT (Baldwin et al, 1981) como método empírico de diferenciação entre diferentes objetos com alta excitação, e *STARBURST* que são galáxias que apresentam uma taxa de formação estelar extremamente elevada. Para as últimas galáxias, são exigidas que possuam uma largura equivalente de $H_{\alpha} > 50 \text{ \AA}$.

No total, obtivemos um total de 60000 galáxias. Dessa amostra, extraímos aquela com largura equivalente $H_{\beta} > 30 \text{ \AA}$ e as galáxias cujas razões de linhas estavam dentro do intervalo canônico de regiões de formação no diagrama BPT. Como resultado obtivemos um total de 976 galáxias *starforming* das quais retiramos os espectros do banco de dados do SDSS. Utilizando os dados do GALEX e SDSS para esses objetos, nós estimamos as cores típicas dessas galáxias como gabarito para as cores intrínsecas de nossos candidatos a galáxias anãs. A extinção da amostra foi corrigida usando o *balmer decrement* assumindo uma lei de extinção de Gordon. A extinção é o fenômeno de atenuação de intensidade da radiação emitida por um objeto devido à absorção e espalhamento por moléculas de poeira presentes no meio interestelar. A figura 7.8 representa o nuvem de cores do GALEX e SDSS, corrigidas pela extinção.

Tendo uma amostra com suas respectivas cores para cada objeto, descrevemos à seguir o procedimento adotado. Em nossa amostra, realizamos uma correção de extinção por uma transladação empírica. Assumindo que a amostra de referência nos fornece cores típicas de galáxias anãs, obtivemos para cada cor a média e sua dispersão σ . Impomos que um objeto

será considerado uma galáxia anã caso suas respectivas cores estejam dentro do intervalo de 3σ das cores da amostra de SDSS. Os intervalos encontrados foram:

- $FUV - NUV$: -0.22 ± 0.24
- $g - r$: -0.05 ± 0.2
- $r - i$: 0.66 ± 0.32

As médias das cores dos objetos para cada par foram obtidos estimando a média e dispersão. Retiramos os objetos cujas cores excediam o limite de 3σ nas cores $FUV - NUV$, $g - r$ e $r - i$. À seguir, recalculamos a média e adotamos esta como média final. Subtraímos a média de nossa amostra e da média de cor de galáxias *starforming* do SDSS, de forma a obter o fator de translação. Posteriormente, transladamos as cores dos objetos de cada par para a média das cores da amostra de referência e impomos como critério que as galáxias anãs estariam dentro do intervalo de 3σ da amostra do SDSS. Na tabela 7.3, temos o resultado final:

Table 7.3: Resultado da classificação de nossa amostra segundo os parâmetros estruturais e translação empírica

Par	Nº de objetos	Nº galáxias
1	392	270
2	345	325
3	563	282
4	447	340
5	786	341
6	129	76
7	441	241
8	518	243

Finalmente, obtivemos uma amostra final de candidatas a galáxias anãs nas vizinhanças de pares de galáxias interagentes. Neste longo procedimento, portanto, conseguimos segregar estrelas de galáxias a partir dos perfis de brilho dos objetos detectados e pelas suas cores. Este foi o procedimento mais extenso e trabalhoso de nosso projeto. A partir desta amostra final, seguiremos para o teste de nossas hipóteses de possível relação física de nossos candidatos com s pares interagentes.

Chapter 8

Resultados e Discussão

Iniciamos nossa discussão com um estudo literário dos objetos que compõem o ambiente a ser estudado. Focamo-nos em investigar a vizinhança de galáxias em interação, a fim de identificar regiões de formação estelar produto deste evento.

Nosso projeto, em uma primeira etapa, objetivou a definição de uma amostra de galáxias em processo de colisão. Estabelecemos critério para identificar, em um grande levantamento astronômico, objetos nesse estágio evolutivo de uma maneira simples e eficiente. Como discutido, os métodos existentes na literatura até então exigem um grande uso de memória e tempo computacional. O critério de separação angular, após alguns testes, mostrou-se satisfatório na busca de galáxias em interação. No final dessa inicial etapa, dispomos de total de aproximadamente 40000 pares candidatos a sistemas efetivamente ligados.

A seguir, impomos novos critérios visando eliminar pares fruto de projeções físicas, e selecionar apenas os sistemas cuja distância nos permitisse detectar galáxias de pequena extensão e baixo brilho. Com a definição de um conjunto de pares, recorreremos a suas respectivas imagens no banco de imageamento do telescópio GALEX. Decidimos analisar a vizinhança em uma região retangular de 500 x 500 kpc centrada no par, utilizando o programa SExtractor, cuja principal função garante a detecção de fontes de radiação em uma imagem populada por objetos astronômicos.

Após o processo de detecção, discutimos sobre a necessidade de separarmos eficientemente as fontes detectadas entre estrelas e galáxias. Após um longo processo, utilizamos uma composição de distintas formas de classificação, de forma a eliminar os objetos pontuais.

O próximo passo consiste de realizarmos o teste de nossa hipótese. Neste capítulo discutiremos os resultados que encontramos após todo o processo de classificação. Apresentemos nas seções à seguir, o detalhamento de nossa investigação científica e os resultados do procedimento.

8.1 Descrição da análise

Devido a alta densidade de objetos, grupos compactos são excelentes ambientes para o estudo de interações entre galáxias e suas consequências ambientais. Após longa discussão nos capítulos anteriores, tomamos conhecimento de que colisões, envolvendo objetos de massa comparáveis, reorganizam o material gasoso de cada galáxia via forças mareais. Como resultado, estruturas como caudas e pontes se formam, tornando possível o surgimento de objetos auto-gravitantes, com características similares a de galáxias anãs observadas no Universo Local.

Baseando-nos nos procedimentos metodológicos desenvolvidos por Torres-Flores et al. (2009), focamos o nosso interesse na análise de galáxias em interação, não necessariamente localizadas em ambientes de elevadas densidades de galáxias massivas. Testaremos a hipótese de que interações gravitacionais entre galáxias podem dar origem, por um processo não necessariamente dominante, à formação de galáxias anãs presentes no Universo Local. Nossa abordagem possuirá três linhas de análise cujos detalhes serão expostos nas subseções à seguir.

Nos capítulos anteriores referentes à metodologia de nosso projeto, identificamos nos arredores de galáxias em colisão objetos de dimensões diminutas, em comparação com os pares centrais. Os estudos de *tidal dwarf galaxies* nos permite observar formações estelares recentes nesses objetos, justificando a utilização de imagens cujas bandas se localizem na faixa do ultravioleta. Consequentemente, nossa análise central será entorno das magnitudes voltadas para faixas mais azuis do espectro eletromagnético.

Atentemo-nos ao fato de que as imagens, devido a diferentes naturezas investigativas, possuem distintos tempos de exposição. Portanto, para que a análise de cada par seja correta, realizamos o mesmo procedimento metodológico em campos de controle. Uma região de controle é caracterizada por uma região circular centrada em uma galáxia de campo cujo *redshift* seja próximo ao do pares. Calculamos o raio como 250 kpc, para o *redshift* desse objeto, levando em consideração a resolução angular de 1.5". Para cada par de galáxia, selecionamos 3 regiões de controle nas imagens do GALEX.

Pelo efeito de deformação intrínseco às bordas de uma imagem obtida por um CCD, as galáxias de controle não podem estar localizadas nessas regiões. Apesar de cada imagem fornecida pelo GALEX possuir um campo com diâmetro de 1.2 graus, não fomos capazes de localizar galáxias, para algumas imagens, que atendam os requisitos necessários. Portanto, devido a semelhantes tempos de exposição para alguns pares, associamos alguns grupos de controle a mais de um par. A tabela 8.1 nos dá informações sobre as galáxias centrais do controle, como a ascensão reta, declinação, *redshift* e quais pares estão associados.

Adicionando à correlação das propriedades dos pares e os grupos de controle, realizaremos um diagnóstico do comportamento dos parâmetros com relação a distância ao par. Para isso, dividimos os pequenos objetos detectados em grupos definidos pela distância a região central. Os cortes foram realizados a cada 50 kpc até o raio final de 250 kpc. Para os objetos localizados em cada subintervalo, realizaremos uma média das propriedades dos objetos e observaremos o comportamento das médias com a distância ao par.

Após a descrição das formas de distribuições de regiões, detalharemos nas subseções seguintes o procedimento realizado para cada abordagem e seus respectivos resultados. Para cada tratamento, discutiremos os produtos encontrados e concluiremos se os ambientes analisados possuem indicativos de regiões de formação estelar recentes organizados em sistemas

Table 8.1: Dispomos na tabela os centros das regiões de controle circulares utilizadas para identificar excessos de emissão ultravioleta em regiões de pares em interação. Cada imagem é centrada em um galáxia solitária, que é identificada pelas suas coordenadas equatoriais e velocidades de recessão.

Nº do Grupo	Ascensão reta(graus)	Declinação (graus)	Redshift	Pares associados
1	151.6547	0.63261	0.02122	1, 2, 3 e 4
	171.42746	-0.32507	0.02526	
	170.8705	-0.307	0.02418	
2	194.20735	27.093762	0.02308	5 e 7
	194.35155	27.49693	0.02448	
	194.119	27.2915	0.02507	
3	184.8508	12.3013	0.02633	6
	185.061	12.8652	0.02419	
	185.0993	12.5791	0.02645	
4	214.33778	11.20552	0.0245	8
	214.2502	11.1209	0.02341	
	214.48061	10.59699	0.0237	

auto-gravitantes.

8.2 Densidade Numérica

A primeira abordagem visará o entendimento das densidades numéricas dos objetos presentes nas vizinhanças de cada par. Esse tratamento se justifica pois, caso a interação entre os pares tenha gerado aglomerações de gás e poeira auto-gravitantes, esses objetos tornaram o meio mais populoso se traduzindo em uma maior quantidade de alvos por área analisada.

Densidades superficiais numéricas são obtidas através de uma contagem de objetos divididos pela área considerada. A análise desse parâmetro será realizada por comparativos com grupos de controle e pela distância ao par, como descrito anteriormente. Para o caso dos grupos controle, realizamos a contagem dos objetos em um raio de 250 kpc em todos os ambientes considerados, ou seja, para as galáxias de controle e para os pares em interação. Desconsideramos na contagem os objetos centrais. Dividimos esses valores pela área circular total, excluindo a área onde se encontra os pares ou a galáxia central. Para os pares, o círculo de exclusão foi definido como a área cujo raio é cinco vezes a distância entre os centros de cada galáxia massiva. Para a amostra de controle, a área é a região circular de raio igual a 15 kpc. Visualmente esse corte se mostrou capaz de eliminar a região de maior brilho da galáxia.

As densidades numéricas das amostras de controle representam o valores médios relacionados a ambientes que não apresentam excesso de radiação ultravioleta pela formação de galáxias anãs em um período menor do que 10^7 anos. Portanto, caso encontremos valores de densidade superiores ao valor médio, teremos um indicativo de que a hipótese é representativa. Em Torres-Flores et al. (2009), HCG 92 apresentou um valor de densidade mais elevado do que os dos grupos de controle. De fato, foram encontrados candidatas a galáxias anãs distribuídos ao longo das cauda mareais componentes do grupo.

Table 8.2: Estruturação do resultado das densidades numéricas superficiais para os pares de galáxias e seus respectivos grupos de controle. Σ indica o valor final da densidade numérica, com índices relacionados ao objeto. GC é referente a identificação dos grupos controle.

Par	$\Sigma_{par} (kpc^{-2})$	$\Sigma_1 (kpc^{-2})$	$\Sigma_2 (kpc^{-2})$	$\Sigma_3 (kpc^{-2})$	GC
1	0.00118 ± 0.00008	0.00108 ± 0.00007	0.00080 ± 0.00006	0.00093 ± 0.00007	1
2	0.00095 ± 0.00007	0.00108 ± 0.00007	0.00080 ± 0.00006	0.00093 ± 0.00007	1
3	0.00143 ± 0.00009	0.00108 ± 0.00007	0.00080 ± 0.00006	0.00093 ± 0.00007	1
4	0.00118 ± 0.00008	0.00108 ± 0.00007	0.00080 ± 0.00006	0.00093 ± 0.00007	1
5	0.00144 ± 0.00009	0.00132 ± 0.00008	0.00094 ± 0.00007	0.00079 ± 0.00006	2
6	0.00034 ± 0.00004	0.00042 ± 0.00007	0.00021 ± 0.00003	0.00027 ± 0.00004	3
7	0.00110 ± 0.00007	0.00132 ± 0.00008	0.00094 ± 0.00007	0.00079 ± 0.00006	2
8	0.00100 ± 0.00007	0.00105 ± 0.00007	0.00118 ± 0.00008	0.00065 ± 0.00008	4

A tabela 8.2 apresenta o resultados das densidades numéricas para cada par, seguidos dos valores de densidade numérica para os campos de controle. Distribuímos as linhas identificando cada par pela numeração utilizada anteriormente no processo de classificação. Para cada par, identificamos o valor de densidade numérica Σ_{par} , seguidos pelos valores para o grupo controle. Como discutimos nesse capítulo, alguns conjuntos de galáxias de campo são referências para mais de um par. A coluna “GC” identifica a numeração imposta originalmente na tabela 8.1.

Notamos que, em geral, não constatamos nenhum caso com elevado excesso de radiação ultravioleta. A maior parte dos objetos encontram-se com $\Sigma_{par} \sim 0.0012 \text{ kpc}^{-2}$, com ligeiras variações. Da mesma forma, o grupos de controle demonstram valores médios de densidade superficial semelhante ao dos pares. Os objetos com maior densidade numérica são relacionados ao par 3 e 5 com $\Sigma_{par,3} = 0.00143 \pm 0.00009 \text{ kpc}^{-2}$ e $\Sigma_{par,4} = 0.00144 \pm 0.00009 \text{ kpc}^{-2}$. Porém, esses valores não são suficientemente expressivos para supor qualquer tipo de excesso.

Os objetos com menor densidade numérica associados pertencem ao sistema 6. O valor de $\Sigma_{par,6} = 0.00034 \pm 0.00004 \text{ kpc}^{-2}$ possui discrepância de quase uma ordem de magnitude com relação aos demais pares. Porém, em comparação com as regiões de controle, observamos uma satisfatória concordância entre os valores. Concluimos que nenhum par de galáxias apresentou um ambiente que mostrou um valor de densidade superficial numérica indicando qualquer tipo de aglomeração de formação estelar nos moldes de nossa hipótese.

Consoante aos grupos de controle, uma segunda ramificação metodológica nessa abordagem está focada na observação comportamental dos valores de densidade superficial com a distância ao par. Dividimos as regiões vizinhas ao par em anéis distando 50 kpc entre si. Da circunferência central, de raio igual a 50 kpc, desconsideramos a contagem dos pares e a área definida como a circunferência cujo raio é cinco vezes a separação física entre os pares. Como descrito anteriormente, o processo consiste na contagem dos objetos de cada anel e a divisão pela sua área. Realizando uma análise da densidade com relação a distância, por um ajuste linear, caso apresentem um coeficiente angular cuja inclinação não seja aproximadamente nula, teremos um indicativo de excesso de objetos localizados no campo da imagem. Uma inclinação negativa indica uma aglomeração de regiões de formação estelar em regiões mais próximas aos pares. Já uma inclinação positiva nos indicaria um excesso de objeto nas regiões mais afastadas ao par.

A figura 8.1 mostra os resultados encontrados para essa abordagem. Para a maioria dos

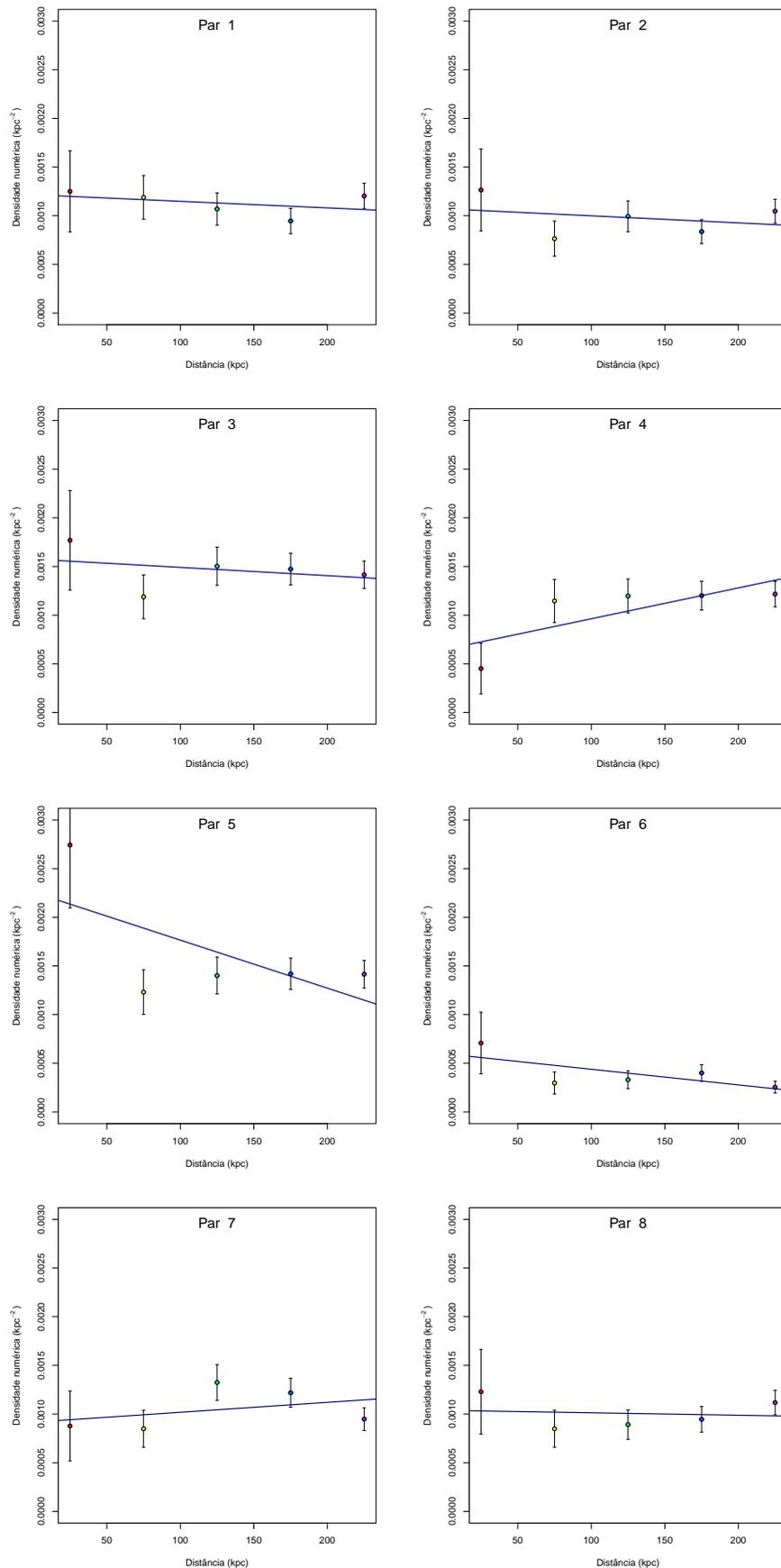


Figure 8.1: Correlação entre as densidade superficiais numéricas com a distância ao par. As populações foram divididas com relação a distância ao centro do sistema. Distribuimos os valores da divisão entre a contagem de objetos pela área analisada, com relação a distância média dos anéis. O ajuste linear em azul identifica se é possível observar regiões com alta quantidade de objetos

pares, o comportamento da densidade superficial não se altera com o afastamento ao par. A maior parte dos pontos, em todos os pares, permanecem próximos ao valor de $\Sigma \sim 0.00011 \text{ kpc}^{-2}$, como observamos na tabela 8.2. Os pares mais representativos em constância são 1, 2, 3 e 8. Os pares 6 e 7 apresentam uma suave inclinação negativa e positiva, respectivamente. Porém, não é suficientemente expressiva para indicar qualquer tipo de excesso.

O par 4 apresenta um caso de inclinação positiva, indicando-nos uma ausência de objetos em regiões menores do que 50 kpc. Os anéis mais distantes permanecem com valores próximos a $\sim 0.0013 \text{ kpc}^{-2}$, corroborando com a tabela 8.2. Encontramos um total de 5 objetos mais próximos do que 50 kpc, sendo que os demais pares apresentam no mínimo 10 pares, exceto o par 7, que apresenta 9 objetos.

O par 5 apresenta uma sobredensidade de objetos abaixo de 50 kpc. A média para as regiões mais longínquos estão em torno de ~ 0.0014 . Observamos um total de 20 pares, tornando-se, para esse intervalo de distância, o sistema com o maior número de detecções. Devido a sua localização, precisamos nos atentar ao fato de que o par pertence ao aglomerado de Coma, o que justifique sua elevada densidade numérica. Na subseção à seguir, analisaremos as cores dos objetos de forma a concluir se realmente a densa população desse par pode ser indicativo de galáxias anãs fruto de interações.

8.3 Cores com relação ao par

Após explorarmos a maneira como o objetos se distribuem espacialmente, podemos averiguar a ordenação de cores com respeito a distância central do objeto. Seguindo o trabalho de Torres-Flores et al. (2009), utilizaremos a cor FUV - NUV para análise, adicionando a análise do comportamento da cor NUV - r. Esta se demonstra interessante devido a distância espectral entre os comprimentos de onda eficientes. Corrigimos a extinção das magnitudes FUV, NUV e r pelas relações: $A_{FUV} = E(B - V) \cdot 8.29$ para FUV, $A_{NUV} = E(B - V) \cdot 8.18$ para NUV (Seibert et al. (2005)) e para encontrar E(B-V) e da banda r, utilizamos um banco de dados virtual*.

Seguiremos uma análise apenas com a distância ao par pela divisão em populações por intervalos espaciais de 50 kpc. Para um determinado conjunto, tomamos as médias das cores para FUV - NUV e NUV - r. Posteriormente, associamos graficamente os valores às distâncias médias de cada intervalo.

Casos as interações tenham gerado subestruturas em suas redondezas com forte emissão de radiação azul, os ajustes lineares apresentarão um coeficiente linear não próximo a zero. O excesso de radiação ultravioleta se manifesta em cores mais azuis, traduzindo-se em cores com valores menores do que a média. Portanto, caso o ajuste apresente inclinação negativa, significa que um excesso de radiação ultravioleta está localizado em regiões mais afastadas ao par. Caso o ajuste apresente uma inclinação positiva, observamos um excesso de radiação em regiões mais próximas ao par.

As figuras 8.2 e 8.3 mostram os resultados para as distribuições de cores de cada par. Tanto para FUV - NUV quanto para NUV - r, representamos os objetos em cores opacas apenas para uma melhor visualização do espalhamento das cores. Os pontos são diferenciados

*<http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

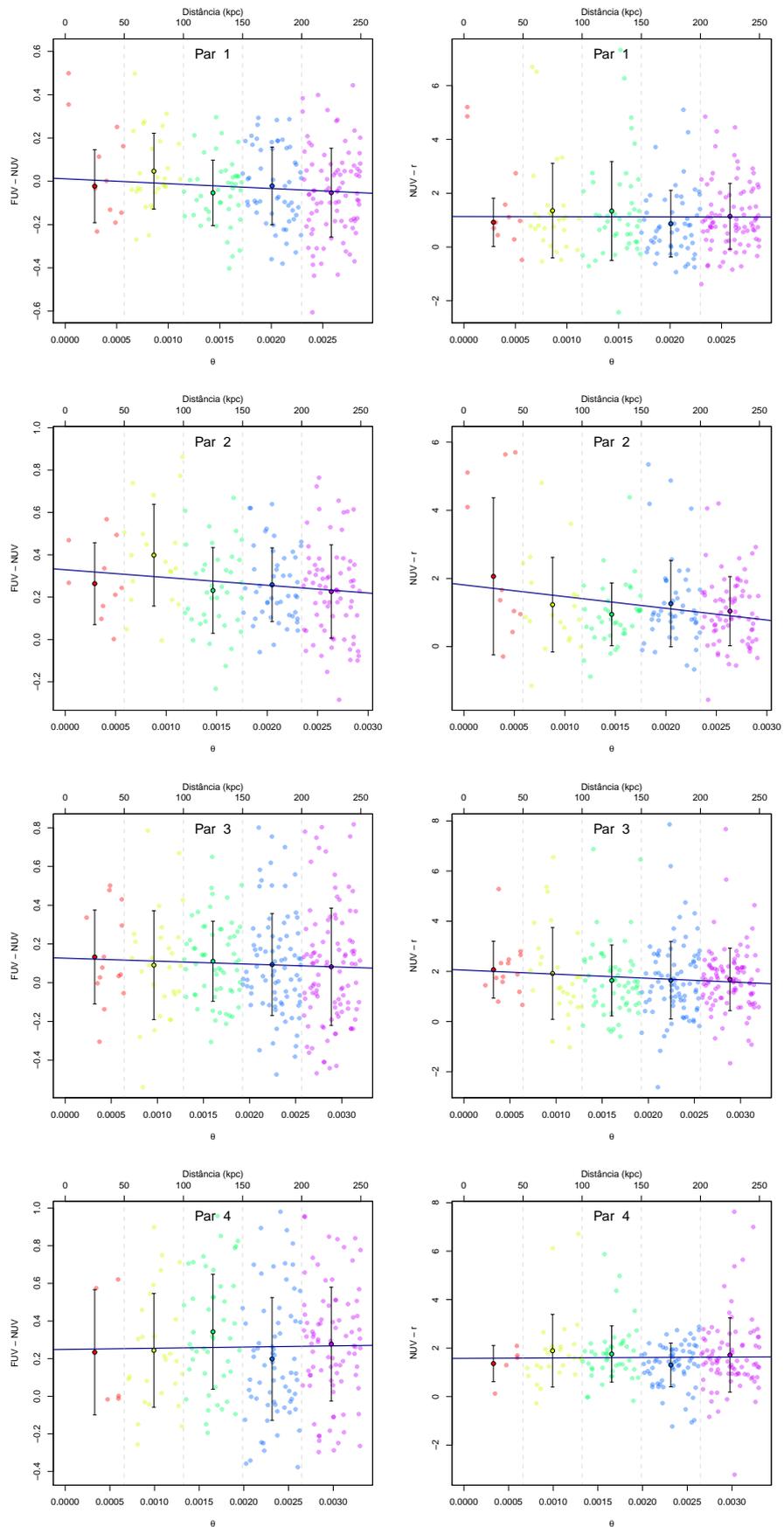


Figure 8.2: Correlação entre as cores FUV - NUV e NUV - r com relação a distância ao par para os sistemas 1 a 4. O objetos foram divididos de acordo com suas distância ao centro do sistema e, para cada subconjunto, as médias das cores foram tomadas e correlacionadas com as distâncias médias de cada anel.

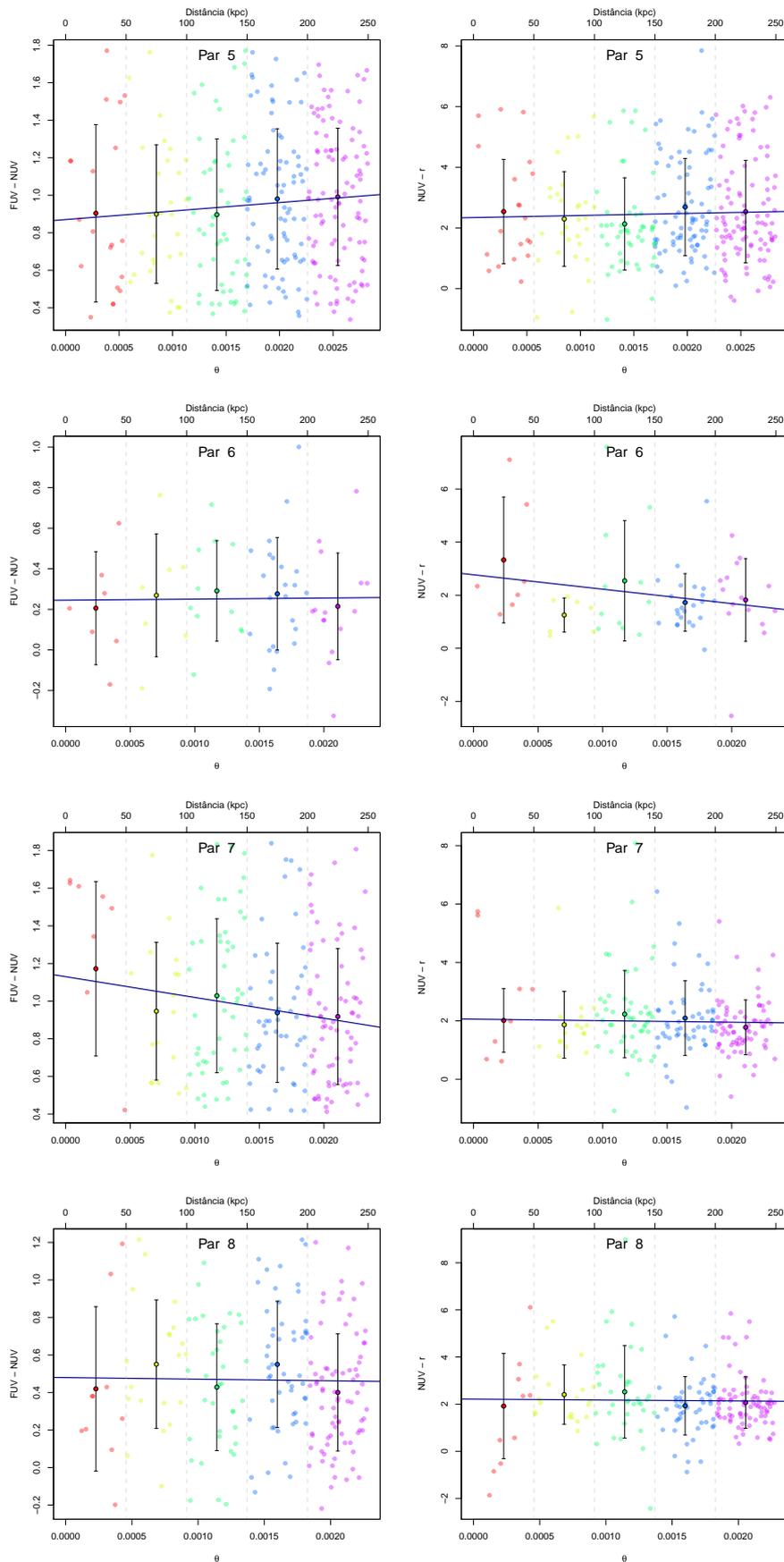


Figure 8.3: Correlação entre as cores FUV - NUV e NUV - r com relação a distância ao par para os sistemas 5 a 8.

por cores segundo o intervalo de distância que se localizam. As cores vermelha, amarela, verde, azul e violeta representam, respectivamente, os intervalos 0 a 50 kpc, 50 a 100 kpc, 100 a 150 kpc, 150 a 200 kpc e 200 a 250 kpc.

Os pontos sólidos representam as médias das cores para cada subintervalo. O erro associado as médias é definido pela raiz quadrada da variância. A reta sólida azul representa o melhor ajuste linear para média das cores. Dessa forma podemos analisar o comportamento das cores para cada par.

Novamente, não encontramos um indicativo de elevado excesso de cores que justifiquem a candidatura a classificação de galáxias anãs mareais. Os pares 1, 3 e 8 apresentam para ambas as cores associação aproximadamente nula. Como visto na subseção anterior, suas densidades numéricas não apresentaram evidências de excessos de aglomerações em regiões próximas ou afastadas do par, portanto, concluímos que tais objetos não apresentam produtos de interações.

As cores FUV - NUV para o par 2 manifestam uma branda inclinação negativa, o que segundo nossa análise de cor, pode representar excessos de objetos azuis em regiões mais afastadas do par. O avermelhamento das regiões próximas são devido a 4 objetos localizados a menos de 50 kpc. Os objetos mais afastados mantêm cores constantes, portanto não identificamos uma situação de grande emissão de ultravioleta em regiões afastadas.

Como pontuado na subseção anterior, a densidade numérica do par 4 apresenta uma baixa densidade nas regiões mais próximas que 50 kpc. As cores na figura 8.2 nos indicam que esses objetos possuem, em média, cores similares a dos objetos mais afastados. Portanto, não notamos nenhum tipo de particularidade nessa amostra.

O par 6 apresenta inclinação para NUV - r negativa. Relembrando sua densidade superficial numérica com o afastamento ao par, notamos um valor timidamente mais elevado para regiões menores que 50 kpc. A média de NUV - r para esse intervalo de distância é levemente mais avermelhado, devido a dois pontos com $NUV - r \gtrsim 5$. O sistema 7, em contrapartida, apresenta uma acentuada inclinação para a cor FUV - NUV negativa. Porém, como concluído anteriormente, isso nos indica uma deficiência de radiação ultravioleta em regiões mais próximas.

Finalmente, analisaremos o caso para o par 5. Sua densidade numérica é observada como tendo uma sobredensidade de objetos nas regiões mais interiores do sistema. A cor NUV - r não apresenta uma inclinação suficiente para que nos indique objetos mais azuis. Porém, para a distribuição de FUV - NUV, observamos um azulamento para a região que manifestou um valor de densidade superficial superior a média.

Portanto, não observamos nas distribuições de cores para o ambiente dos pares grandes inclinações devido a presença de uma população de objetos com intensa formação estelar. Porém, o par 5 demonstrou tanto para a densidade superficial quando para distribuição em FUV - NUV uma peculiar indicação de objetos azuis. Para finalmente solucionar essa questão, analisaremos na subseção à seguir a distribuições da cor FUV - NUV para as regiões do par e da amostra de controle. Dessa forma, daremos um ponto final na pendência do último par com relação a possível indicação de galáxias anãs mareais.

8.4 Distribuição FUV - NUV

A terceira e última abordagem consiste da comparação entre a distribuição de cor FUV - NUV para os objetos ao redor dos pares e as regiões de controle, pela análise de seus histogramas. Dessa forma, poderemos investigar o comportamento global das cores das candidatas a galáxias anãs em relação a uma população típica que não apresenta excessos de formação estelar por eventos de interação.

Observaremos se as distribuições de cores seguem o mesmo comportamento que as distribuições das amostras controle. Caso o objetos apresentem uma média de FUV - NUV mais azul que a média controle, poderemos supor a presença de uma população de objetos excessiva na região. Caso observemos média semelhantes, ou mais avermelhadas, não poderemos supor tal afirmação.

A figura 8.4 e 8.5 contêm todas as composições de histogramas para as amostras de controle e os pares. Em cada gráfico, os histogramas em cor azul claro representam as cores FUV - NUV para as populações de controle. Sobrescritos, os histogramas cinzas representam a população circundante das galáxias massivas interagentes centrais. Na legenda, localizada no canto superior direita, encontramos a média e o desvio padrão, entre parênteses, de cada conjunto representado.

Além disso, na coluna direita, associamos a cada gráfico as imagens na banda NUV de cada sistema estudado. Os objetos detectados são destacados por círculos de $18''$. Os círculos que representam objetos com cores FUV - NUV mais azuis que a média de controle, possuem cor azul. Já os objetos com cores mais vermelhas, possuem cor vermelha. Objetos localizados próximos aos vértices das imagens possuem mais de 250 kpc de distância ao centro, portanto, esses não foram levados em consideração em nossa discussão.

Inicialmente, observamos que as distribuições de controle possuem comportamento aproximadamente gaussiano, porém suas médias possuem diferenciações. A distribuição mais azul está relacionada ao grupo de controle dos pares 1, 2, 3 e 4 com pico em $(FUV - NUV)_{C1} = 0.0087 \pm 0.0553$. A distribuição mais avermelhada é relacionada ao par 8 com pico em $(FUV - NUV)_{C4} = 0.4506 \pm 0.1235$. As demais distribuições possuem médias intermediárias assinaladas nas figuras.

Novamente, os pares 1, 3, 6 e 8 manifestam distribuições semelhantes aos de seus respectivos grupos controle. De todos os pares, o par 1 apresenta população mais azulada com pico em $(FUV - NUV)_1 = -0.0024 \pm 0.0305$. Aproximadamente 58% de seus objetos são mais azuis que a média de controle. Esses objetos estão assinalados por circunferências azuis. Os pares 4 e 6 apresentam médias próximas de respectivamente $(FUV - NUV)_{C4} = 0.2467 \pm 0.0068$ e $(FUV - NUV)_{C8} = 0.2774 \pm 0.0753$.

O par 2 possui deslocamento acentuado, sendo portanto uma população mais avermelhada, em comparação com sua média controle. A visível inclinação negativa na figura 8.2 confirma tal comportamento. O par 4 destaca-se pelas larga variedade de cores observadas. Possui apenas 23% de seus objetos mais azuis que a média controle.

Por fim, os pares 5 e 7 possuem o comportamento mais discrepante, apresentando um alto avermelhamento tanto em comparação com sua amostra de controle, quanto com a da distribuição de pares em geral. Suas médias são respectivamente $(FUV - NUV)_{C5} = 0.9557 \pm 0.1424$ e $(FUV - NUV)_{C7} = 0.4636 \pm 0.1104$. Não apresentam nenhum objeto que possua cor FUV - NUV mais azul que a média controle.

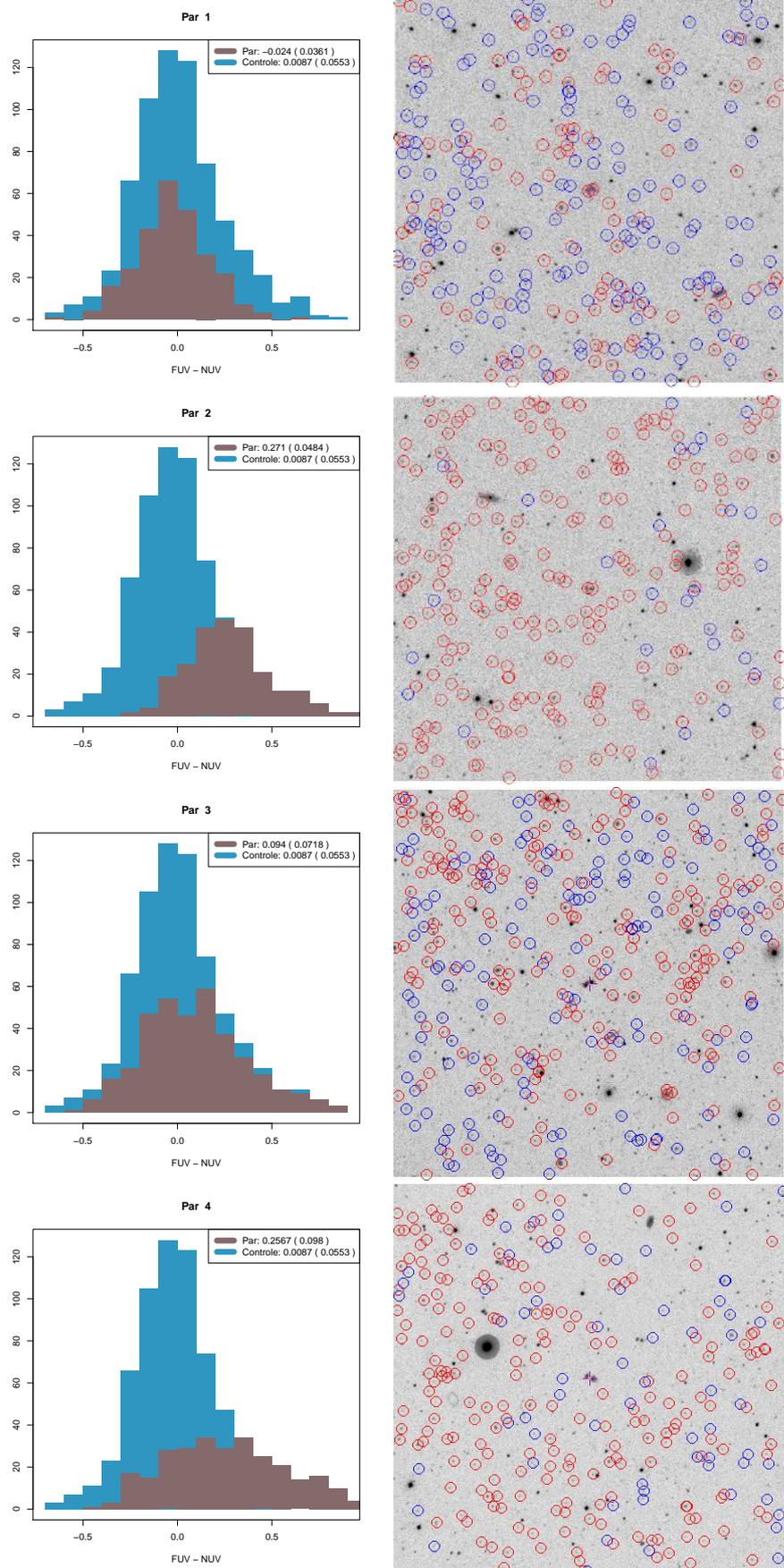


Figure 8.4: Na coluna esquerda, encontram-se os histogramas que demonstram a distribuição das cores FUV - NUV para a população dos pares, em cinza, e a população de controle, em azul, de 1 a 4. Na coluna direita, encontram-se os respectivos campos detectados com objetos detectados assinalados por circunferências. (continuação legenda próximo histograma)

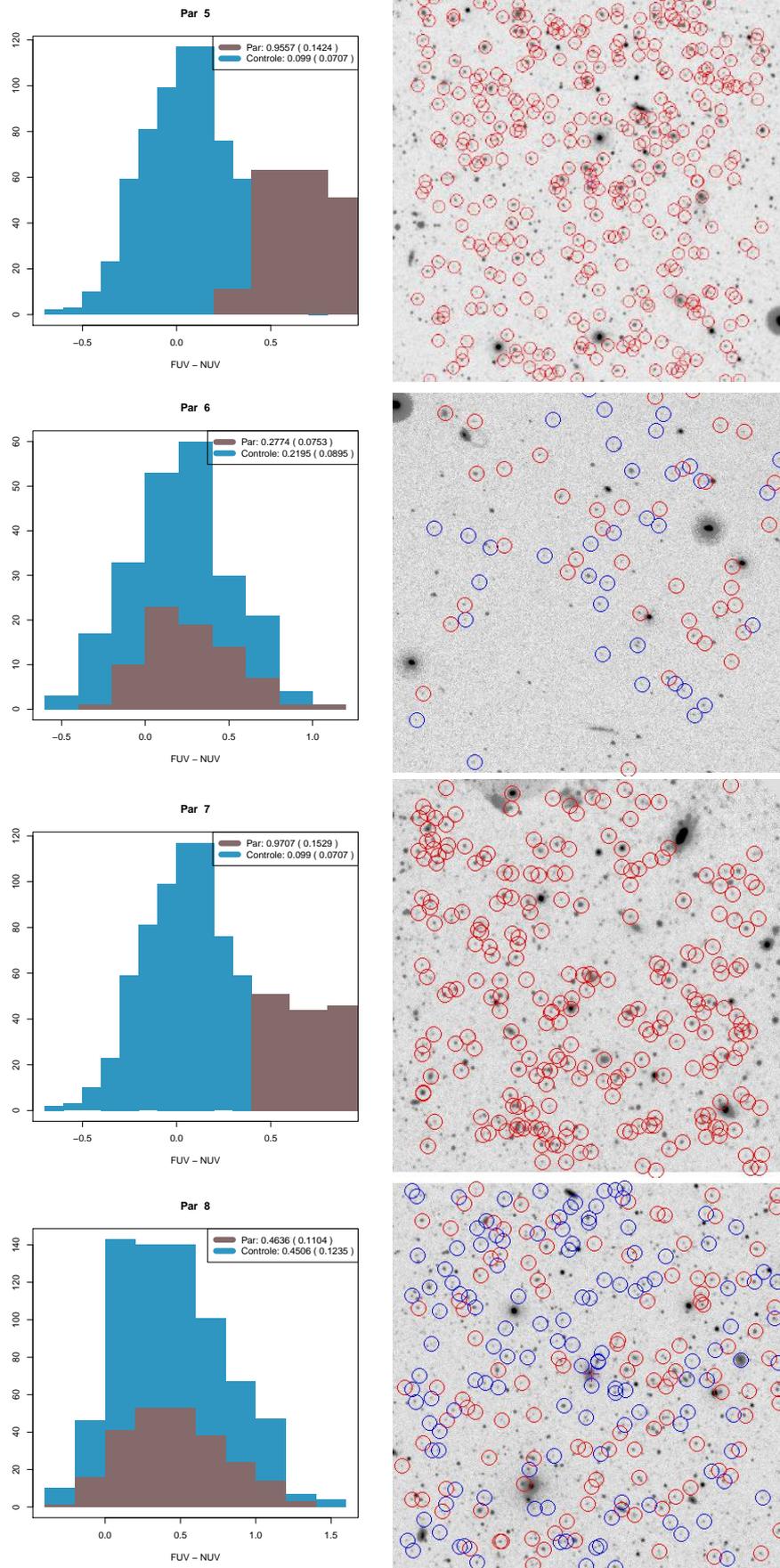


Figure 8.5: Casos de 5 a 8 . (continuação) As circunferências que possuem cor azul indicam objetos cujas cores FUV - NUV estão acima da média. Circunferências cores pretas indicam objetos cujas cores FUV - NUV estão abaixo da média de controle.

Retornando a discussão da subseção anterior, o par 5 apresentou uma alta densidade numérica para os objetos mais próximos que 50 kpc. Porém, apesar desse fato e de conter nessa região alguns objetos mais azuis que objetos mais afastados ao par, a análise dos histogramas nos mostra que toda a população é deslocada para o vermelho, o que nos indica a ausência de regiões de formação estelar fruto de interações de galáxias.

Finalmente, fomos capazes de averiguar o caso de cada ambiente de cada sistema de nossa amostra, o que nos leva a conclusão de que não encontramos indícios de formação de galáxias anãs mareais nas regiões vizinhas de nossos pares. Porém, podemos discutir os motivos para esse resultado, ao se levar em consideração todos os possíveis ruídos que nosso procedimento metodológico possa ter falhado em diminuir, ou até acrescentado.

8.5 Discussão

Apesar de alguns pares apresentarem suaves variações das propriedades de objetos em distâncias inferiores a 50 kpc, a análise a partir do cruzamento entre as propriedades não corroborou com o destaque de possíveis peculiaridades associadas a tais populações. Listemos os possíveis motivos que levaram ao resultado observado:

- Temos uma quantidade insuficiente de sistemas para realizar uma estatística confiável que nos dê uma resposta final para nossa hipótese. Portanto, apesar de não haver indícios, necessitaríamos de uma amostra mais numerosa. A escolha dos valores limites de alguns parâmetros na escolha da amostra podem ter influenciado de tal maneira que a tornou irrisória. Durante nossa definição de critérios, que favorecessem a detecção de pequenos objetos segundo nossa capacidade observacional, adotamos um critério de distância máxima do sistema até a Terra de 110 Mpc. Esse fator é fruto do princípio de que esta seria a distância máxima para se observar galáxias anãs com $M_B \leq -13$ mag. Esse corte permite incluir em nossa detecção galáxias anãs mais avermelhadas como galáxias anãs elípticas. Mas, essa imposição nos custou a possibilidade de observar ambientes mais longínquos que contivessem galáxias anãs com magnitudes típicas de galáxias mareais.

Possíveis exemplos foram extraídos da primeira amostra de teste do BIDHU. A figura 8.6 é composta de três pares de galáxias distando da direita para esquerda, 140, 120.5 e 160.2 Mpc. Para esses exemplos, observamos a presença de gás expulso devido às forças gravitacionais, o que elevam nossa probabilidade de encontrar regiões de formação estelar em sua estrutura. Portanto, um corte para detecção de objetos mais luminosos do que adotado nos capítulos anteriores permite incluir mais pares interatuantes da amostra do BIDHU, possibilitando uma análise mais abundante.

Um fator adicional que se mostrou limitante foi a disponibilidade de imagens do levantamento GALEX. A princípio, pelos critérios de definição de amostra, obtivemos do BIDHU um total de 16 pares. A busca de imagens ultravioleta no banco de dados do GALEX nos limitou a uma diminuição de nossa amostra para apenas 8 pares. Alguns objetos não foram observados pelo telescópio e outros possuíam imagens com baixa resolução, impossibilitando uma detecção e fotometria confiáveis de objetos.

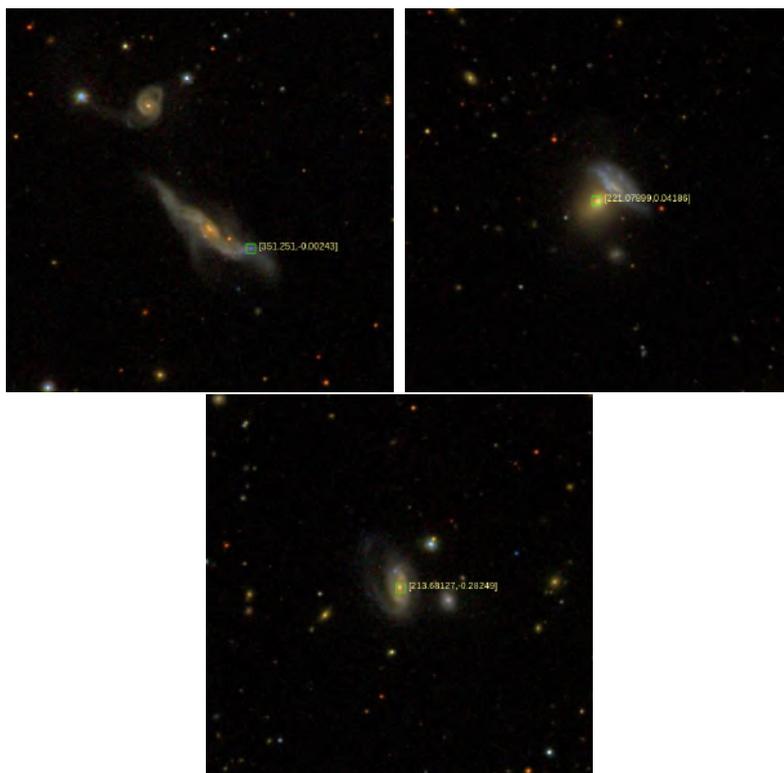


Figure 8.6: Exemplos de galáxias que não atendem nossos critérios de seleção porém apresentam estruturas capazes de comportar galáxias anãs. Suas localizações são assinaladas nas imagens.

- O tipo morfológico dos pares também podem ter sido determinante nos resultados encontrados. 75% dos pares são compostos de galáxias elípticas com cores que indicam populações estelares antigas. Como discutido no capítulo 5, as forças mareais possuem pouca influência sobre as estruturas de galáxias *early-type* devido a distribuição aproximadamente isotrópica das velocidades orbitais de suas componentes. Os resultados encontrados para esses sistemas corroboram com essa afirmação teórica. Portanto, para análises futuras, é necessário se priorizar colisões entre galáxias espirais com muita quantidade de material gasoso. Desta forma, a probabilidade de se encontrar objetos formados desse material expulso é superior.
- Levamos em consideração que todos os objetos estão a uma mesma distância, pertencendo ao sistema do par. Portanto, tanto galáxias mais luminosas que se encontram em maiores distâncias quanto galáxias menos luminosas localizadas em menores distâncias podem introduzir um significativo ruído em nossas análises. Portanto, uma análise espectroscópica dos objetos identificados nos permitirá distinguir quais objetos pertencem ao sistema e quais são efeitos de projeção.
- Não levamos em consideração a extinção galáctica de cada objeto pois, com os dados disponíveis, não somos capazes de quantificá-las. Portanto, uma análise espectroscópica utilizando razões de linha de *Balmer* seria capaz de nos indicar informações sobre cada extinção intrínseca, o que poderia ser posteriormente eliminada.
- A maior parte de nossos esforços foram destinados a desenvolver uma forma de classificação que não permitisse a perda de objetos fracos na tentativa de eliminação de

estrelas de nossa amostra. A transladação empírica necessitou que nós subtraíssemos de cada cor a diferença do valor das média da população de candidatos, e de uma população de galáxias do SDSS. Essa suposição pode ter introduzido ruído em nossa amostra.

Chapter 9

Conclusões e Perspectivas Futuras

Nosso projeto de Iniciação Científica objetivou entender como ambientes extragalácticos de galáxias em colisão são organizados e sua influência sobre o produto final gerado. O apelo a esse tipo de estudo é importante, pois estamos estudando sistemas externos a fim de entender o sistema no qual vivemos. De fato, a Galáxia está em processo de fusão com a galáxia M31. Desejamos testar a hipótese de que interações entre galáxias massivas são capazes de formar aglomerações de gás e estrelas que possuam características similares a de galáxias anãs conhecidas. Caso identifiquemos, teríamos um indicativo observacional de um processo de formação de galáxias anãs no Universo.

O processo foi dividido em um inicial estudo literário das componentes do agrupamento de estruturas estudadas. Portanto, nos capítulos iniciais discutimos sobre os processos de interações entre galáxias, propriedades de galáxias anãs e seus modos de formação. Notamos que esses tópicos possuem uma grande diversidade de estudos e levantam questões que serão discutidas pelas próximas décadas.

O procedimento metodológico resultou em interessantes implicações. Desenvolvemos um método de seleção de galáxias interagentes que utiliza parâmetros que não exigem um processo computacionalmente custoso. Como consequência, obtivemos um total de aproximadamente 40000 candidatos a pares em interação que necessitam de uma confirmação final. Portanto, as próximas etapas consistem da busca por métodos de validação de cada caso.

Após todo o processo de seleção de amostra, compreendemos que os parâmetros de seleção utilizados limitaram a quantidade final de componentes a serem estudados. Porém, os passos subsequentes podem ser facilmente reproduzidos. Portanto, como perspectiva, desejamos revisar os valores limites de cada critério de seleção, o que é possível pela discussão final do capítulo 8. Posteriormente, reproduzir toda a metodologia subsequente para novos sistemas, priorizando aqueles que possuam pelo menos uma galáxia espiral.

O processo de classificação entre galáxias e estrelas nos foi custoso e afirmamos que passamos a maior parte do tempo, dos 2 anos de projeto, na busca por uma identificação que nos permitisse manter em nossa amostra objetos com fraca magnitude, que poderiam ser eliminados caso classificados pelos modos mais tradicionais. Portanto, inferimos que investigações sobre nosso método de diferenciação para amostras mais numerosas podem ser

interessantes para a classificação dos tipos de objetos estudados neste trabalho.

Por fim, constatamos que não identificamos indícios, em cada sistema, que corroborassem nossa hipótese. Os sistemas manipulados não apresentaram peculiaridades locais de suas propriedades, fazendo-nos supor que essas regiões fossem fruto do processo de criação de galáxias anãs. Na seção 9.6 discutimos as possíveis causas.

A espectroscopia dos objetos é de fundamental utilidade pois realizamos a suposição de que todos os objetos estavam contidos no sistema. Além disso, podemos identificar a extinção galáctica de cada objeto pelas razões das linhas de Balmer, a fim de eliminá-la. Portanto, desejamos obter a espectroscopia das galáxias anãs observadas a fim de separar propriamente o que não pertence ao sistema em interação e entender acuradamente sobre o histórico de formação estelar de cada aglomeração.

Dada toda a discussão realizada, podemos, finalmente, chegar a conclusão final de que, apesar de não identificarmos um sinal que leve a averiguar um efeito causal entre a formação de galáxias anãs e interações entre galáxias massivas, nossos dados não permitem uma estatística final suficiente. Necessitamos expandir o número total de componentes de nossa amostra e buscar pelos parâmetros adicionais mencionados nesse capítulo. Desta forma, poderemos realizar um teste de hipótese estatisticamente satisfatório, e no final observar se o efeito causal é observado.

Bibliography

- Abadi, M. G., Navarro, J. F., Steinmetz, M., and Eke, V. R. (2003). Simulations of Galaxy Formation in a Λ Cold Dark Matter Universe. II. The Fine Structure of Simulated Galactic Disks. *ApJ*, 597:21–34.
- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., Allam, S. S., Allende Prieto, C., An, D., Anderson, K. S. J., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., and et al. (2009). The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *ApJS*, 182:543–558.
- Allam, S. S., Tucker, D. L., Smith, J. A., Lee, B. C., Annis, J., Lin, H., Karachentsev, I. D., and Laubscher, B. E. (2004). Merging Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey Early Data Release. *AJ*, 127:1883–1899.
- Allende Prieto, C., Sivarani, T., Beers, T. C., Lee, Y. S., Koesterke, L., Shetrone, M., Sneden, C., Lambert, D. L., Wilhelm, R., Rockosi, C. M., Lai, D. K., Yanny, B., Ivans, I. I., Johnson, J. A., Aoki, W., Bailer-Jones, C. A. L., and Re Fiorentin, P. (2008). The SEGUE Stellar Parameter Pipeline. III. Comparison with High-Resolution Spectroscopy of SDSS/SEGUE Field Stars. *AJ*, 136:2070–2082.
- Ambartsumian, V. A. (1961). Instability phenomena in systems of galaxies. *AJ*, 66:536–540.
- Annunziatella, M., Mercurio, A., Brescia, M., Cavuoti, S., and Longo, G. (2013). Inside Catalogs: A Comparison of Source Extraction Software. *PASP*, 125:68.
- Arp, H. (1966). *Atlas of peculiar galaxies*.
- Arp, H. C. (1972). Ejection of Small Compact Galaxies from Larger Galaxies. In Evans, D. S., Wills, D., and Wills, B. J., editors, *External Galaxies and Quasi-Stellar Objects*, volume 44 of *IAU Symposium*, page 380.
- Bahcall, J. N. and Casertano, S. (1984). Velocity dispersions of disk stars in spiral galaxies. *ApJ*, 284:L35–L38.
- Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Ž., Lupton, R. H., Nichol, R. C., and Szalay, A. S. (2004). Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies. *ApJ*, 600:681–694.

- Barbosa, W. V. (2015). Bidhu: Implementação de ferramenta para detecção de galáxias em colisão. *TCC, UFAL*.
- Barnes, J. E. and Hernquist, L. (1992). Dynamics of interacting galaxies. *ARA&A*, 30:705–742.
- Bender, R., Burstein, D., and Faber, S. M. (1992). Dynamically hot galaxies. I - Structural properties. *ApJ*, 399:462–477.
- Bertin, E. (2011). Automated Morphometry with SExtractor and PSFEx. In Evans, I. N., Accomazzi, A., Mink, D. J., and Rots, A. H., editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*, volume 442 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 435.
- Bianchi, L., Rodriguez-Merino, L., Viton, M., Laget, M., Efremova, B., Herald, J., Conti, A., Shiao, B., Gil de Paz, A., Salim, S., Thakar, A., Friedman, P. G., Rey, S.-C., Thilker, D., Barlow, T. A., Budavári, T., Donas, J., Forster, K., Heckman, T. M., Lee, Y.-W., Madore, B. F., Martin, D. C., Milliard, B., Morrissey, P., Neff, S. G., Rich, R. M., Schiminovich, D., Seibert, M., Small, T., Szalay, A. S., Wyder, T. K., Welsh, B. Y., and Yi, S. K. (2007). Statistical Properties of the GALEX-SDSS Matched Source Catalogs, and Classification of the UV Sources. *ApJS*, 173:659–672.
- Binggeli, B., Sandage, A., and Tarenghi, M. (1984). Studies of the Virgo Cluster. I - Photometry of 109 galaxies near the cluster center to serve as standards. *AJ*, 89:64–82.
- Binney, J. and Tremaine, S. (1987). *Galactic dynamics*.
- Bowen, I. S. and Vaughan, Jr., A. H. (1973). The optical design of the 40-in. telescope and of the Irénée DuPont telescope at Las Campanas Observatory, Chile. *Appl. Opt.*, 12:1430–1434.
- Braine, J., Lisenfeld, U., Due, P.-A., and Leon, S. (2000). Formation of molecular gas in the tidal debris of violent galaxy-galaxy interactions. *Nature*, 403:867–869.
- Bucher, M. (2015). Physics of the cosmic microwave background anisotropy. *International Journal of Modern Physics D*, 24:1530004–303.
- Bullock, J. S. (2010). Notes on the Missing Satellites Problem. *ArXiv e-prints*.
- Bundy, K., Bershady, M. A., Law, D. R., Yan, R., Drory, N., MacDonald, N., Wake, D. A., Cherinka, B., Sánchez-Gallego, J. R., Weijmans, A.-M., Thomas, D., Tremonti, C., Masters, K., Cocato, L., Diamond-Stanic, A. M., Aragón-Salamanca, A., Avila-Reese, V., Badenes, C., Falcón-Barroso, J., Belfiore, F., Bizyaev, D., Blanc, G. A., Bland-Hawthorn, J., Blanton, M. R., Brownstein, J. R., Byler, N., Cappellari, M., Conroy, C., Dutton, A. A., Emsellem, E., Etherington, J., Frinchaboy, P. M., Fu, H., Gunn, J. E., Harding, P., Johnston, E. J., Kauffmann, G., Kinemuchi, K., Klaene, M. A., Knapen, J. H., Leauthaud, A., Li, C., Lin, L., Maiolino, R., Malanushenko, V., Malanushenko, E., Mao, S., Maraston, C., McDermid, R. M., Merrifield, M. R., Nichol, R. C., Oravetz, D., Pan, K., Parejko,

- J. K., Sanchez, S. F., Schlegel, D., Simmons, A., Steele, O., Steinmetz, M., Thanjavur, K., Thompson, B. A., Tinker, J. L., van den Bosch, R. C. E., Westfall, K. B., Wilkinson, D., Wright, S., Xiao, T., and Zhang, K. (2015). Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory. *ApJ*, 798:7.
- Buta, R. and Combes, F. (1996). Galactic Rings. *Fund. Cosmic Phys.*, 17:95–281.
- Clausius, R. (1870). Ueber einen auf die Wärme anwendbaren mechanischen Satz. *Annalen der Physik*, 217:124–130.
- Croton, D. J., Springel, V., White, S. D. M., De Lucia, G., Frenk, C. S., Gao, L., Jenkins, A., Kauffmann, G., Navarro, J. F., and Yoshida, N. (2006). The many lives of active galactic nuclei: cooling flows, black holes and the luminosities and colours of galaxies. *MNRAS*, 365:11–28.
- Dawson, K. S., Schlegel, D. J., Ahn, C. P., Anderson, S. F., Aubourg, É., Bailey, S., Barkhouser, R. H., Bautista, J. E., Beifiori, A., Berlind, A. A., Bhardwaj, V., Bizyaev, D., Blake, C. H., Blanton, M. R., Blomqvist, M., Bolton, A. S., Borde, A., Bovy, J., Brandt, W. N., Brewington, H., Brinkmann, J., Brown, P. J., Brownstein, J. R., Bundy, K., Busca, N. G., Carithers, W., Carnero, A. R., Carr, M. A., Chen, Y., Comparat, J., Connolly, N., Cope, F., Croft, R. A. C., Cuesta, A. J., da Costa, L. N., Davenport, J. R. A., Delubac, T., de Putter, R., Dhital, S., Ealet, A., Ebelke, G. L., Eisenstein, D. J., Escoffier, S., Fan, X., Filiz Ak, N., Finley, H., Font-Ribera, A., Génova-Santos, R., Gunn, J. E., Guo, H., Haggard, D., Hall, P. B., Hamilton, J.-C., Harris, B., Harris, D. W., Ho, S., Hogg, D. W., Holder, D., Honscheid, K., Huehnerhoff, J., Jordan, B., Jordan, W. P., Kauffmann, G., Kazin, E. A., Kirkby, D., Klaene, M. A., Kneib, J.-P., Le Goff, J.-M., Lee, K.-G., Long, D. C., Loomis, C. P., Lundgren, B., Lupton, R. H., Maia, M. A. G., Makler, M., Malanushenko, E., Malanushenko, V., Mandelbaum, R., Manera, M., Maraston, C., Margala, D., Masters, K. L., McBride, C. K., McDonald, P., McGreer, I. D., McMahon, R. G., Mena, O., Miralda-Escudé, J., Montero-Dorta, A. D., Montesano, F., Muna, D., Myers, A. D., Naugle, T., Nichol, R. C., Noterdaeme, P., Nuza, S. E., Olmstead, M. D., Oravetz, A., Oravetz, D. J., Owen, R., Padmanabhan, N., Palanque-Delabrouille, N., Pan, K., Parejko, J. K., Pâris, I., Percival, W. J., Pérez-Fournon, I., Pérez-Ràfols, I., Petitjean, P., Pfaffenberger, R., Pforr, J., Pieri, M. M., Prada, F., Price-Whelan, A. M., Raddick, M. J., Rebolo, R., Rich, J., Richards, G. T., Rockosi, C. M., Roe, N. A., Ross, A. J., Ross, N. P., Rossi, G., Rubiño-Martín, J. A., Samushia, L., Sánchez, A. G., Sayres, C., Schmidt, S. J., Schneider, D. P., Scóccola, C. G., Seo, H.-J., Sheldon, A., Sheldon, E., Shen, Y., Shu, Y., Slosar, A., Smee, S. A., Snedden, S. A., Stauffer, F., Steele, O., Strauss, M. A., Streblyanska, A., Suzuki, N., Swanson, M. E. C., Tal, T., Tanaka, M., Thomas, D., Tinker, J. L., Tojeiro, R., Tremonti, C. A., Vargas Magaña, M., Verde, L., Viel, M., Wake, D. A., Watson, M., Weaver, B. A., Weinberg, D. H., Weiner, B. J., West, A. A., White, M., Wood-Vasey, W. M., Yèche, C., Zehavi, I., Zhao, G.-B., and Zheng, Z. (2013). The Baryon Oscillation Spectroscopic Survey of SDSS-III. *AJ*, 145:10.
- de Mello, D. F., Torres-Flores, S., and Mendes de Oliveira, C. (2008). Searching for Star Formation Outside Galaxies: Multiwavelength Analysis of the Intragroup Medium of Hickson Compact Group 100. *AJ*, 135:319–325.

- de Mello, D. F., Urrutia-Viscarra, F., Mendes de Oliveira, C., Torres-Flores, S., Carrasco, E. R., and Cypriano, E. (2012). Star formation in H I tails: HCG 92, HCG 100 and six interacting systems. *MNRAS*, 426:2441–2451.
- de Vaucouleurs, G. (1948). Recherches sur les Nebuleuses Extragalactiques. *Annales d'Astrophysique*, 11:247.
- Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G., and Wilkinson, D. T. (1965). Cosmic Black-Body Radiation. *ApJ*, 142:414–419.
- Dinescu, D. I., Girard, T. M., and van Altena, W. F. (1999). Space Velocities of Globular Clusters. III. Cluster Orbits and Halo Substructure. *AJ*, 117:1792–1815.
- Duc, P.-A. (2012). Birth, Life and Survival of Tidal Dwarf Galaxies. *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 28:305.
- Duc, P.-A., Bournaud, F., and Masset, F. (2004). A top-down scenario for the formation of massive Tidal Dwarf Galaxies. *A&A*, 427:803–814.
- Duc, P.-A. and Renaud, F. (2011). Tides in colliding galaxies. *Lecture Notes in Physics*, page 46.
- Eggen, O. J., Lynden-Bell, D., and Sandage, A. R. (1962). Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed. *ApJ*, 136:748.
- Eke, V. R., Cole, S., and Frenk, C. S. (1996). Cluster evolution as a diagnostic for Omega. *MNRAS*, 282.
- Ellis, R. S., Smail, I., Dressler, A., Couch, W. J., Oemler, Jr., A., Butcher, H., and Sharples, R. M. (1997). The Homogeneity of Spheroidal Populations in Distant Clusters. *ApJ*, 483:582–596.
- Elmegreen, B. G., Kaufman, M., and Thomasson, M. (1993). An interaction model for the formation of dwarf galaxies and 10 exp 8 solar mass clouds in spiral disks. *ApJ*, 412:90–98.
- Faber, S. M. and Lin, D. N. C. (1983). Is there nonluminous matter in dwarf spheroidal galaxies. *ApJ*, 266:L17–L20.
- Ferguson, H. C. and Binggeli, B. (1994). Dwarf elliptical galaxies. *A&A Rev.*, 6:67–122.
- Fixsen, D. J. (2009). The Temperature of the Cosmic Microwave Background. *ApJ*, 707:916–920.
- Freedman, W. L. (2000). The Hubble constant and the expansion age of the Universe. *Phys. Rep.*, 333:13–31.
- Friedmann, A. (1922). Über die Krümmung des Raumes. *Zeitschrift für Physik*, 10:377–386.

- Frieman, J. A., Turner, M. S., and Huterer, D. (2008). Dark Energy and the Accelerating Universe. *ARA&A*, 46:385–432.
- Genel, S., Vogelsberger, M., Springel, V., Sijacki, D., Nelson, D., Snyder, G., Rodriguez-Gomez, V., Torrey, P., and Hernquist, L. (2014). Introducing the Illustris project: the evolution of galaxy populations across cosmic time. *MNRAS*, 445:175–200.
- Gil de Paz, A., Boissier, S., Madore, B. F., Seibert, M., Joe, Y. H., Boselli, A., Wyder, T. K., Thilker, D., Bianchi, L., Rey, S.-C., Rich, R. M., Barlow, T. A., Conrow, T., Forster, K., Friedman, P. G., Martin, D. C., Morrissey, P., Neff, S. G., Schiminovich, D., Small, T., Donas, J., Heckman, T. M., Lee, Y.-W., Milliard, B., Szalay, A. S., and Yi, S. (2007). The GALEX Ultraviolet Atlas of Nearby Galaxies. *ApJS*, 173:185–255.
- Gilbank, D. G., Gladders, M. D., Yee, H. K. C., and Hsieh, B. C. (2011). The Red-sequence Cluster Survey-2 (RCS-2): Survey Details and Photometric Catalog Construction. *AJ*, 141:94.
- Girardi, M., Biviano, A., Giuricin, G., Mardirossian, F., and Mezzetti, M. (1993). Velocity dispersions in galaxy clusters. *ApJ*, 404:38–50.
- Graham, A. W. and Guzmán, R. (2003). HST Photometry of Dwarf Elliptical Galaxies in Coma, and an Explanation for the Alleged Structural Dichotomy between Dwarf and Bright Elliptical Galaxies. *AJ*, 125:2936–2950.
- Gunn, J. E., Sigmund, W. A., Mannery, E. J., Owen, R. E., Hull, C. L., Leger, R. F., Carey, L. N., Knapp, G. R., York, D. G., Boroski, W. N., Kent, S. M., Lupton, R. H., Rockosi, C. M., Evans, M. L., Waddell, P., Anderson, J. E., Annis, J., Barentine, J. C., Bartoszek, L. M., Bastian, S., Bracker, S. B., Brewington, H. J., Briegel, C. I., Brinkmann, J., Brown, Y. J., Carr, M. A., Czarapata, P. C., Drennan, C. C., Dombeck, T., Federwitz, G. R., Gillespie, B. A., Gonzales, C., Hansen, S. U., Harvanek, M., Hayes, J., Jordan, W., Kinney, E., Klaene, M., Kleinman, S. J., Kron, R. G., Kresinski, J., Lee, G., Limmongkol, S., Lindenmeyer, C. W., Long, D. C., Loomis, C. L., McGehee, P. M., Mantsch, P. M., Neilsen, Jr., E. H., Neswold, R. M., Newman, P. R., Nitta, A., Peoples, Jr., J., Pier, J. R., Prieto, P. S., Prosapio, A., Rivetta, C., Schneider, D. P., Snedden, S., and Wang, S.-i. (2006). The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey. *AJ*, 131:2332–2359.
- Hertzsprung, E. (1913). Über die räumliche Verteilung der Veränderlichen vom δ Cephei-Typus. *Astronomische Nachrichten*, 196:201.
- Hickson, P. (1982). Systematic properties of compact groups of galaxies. *ApJ*, 255:382–391.
- Hubble, E. (1929). A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Proceedings of the National Academy of Science*, 15:168–173.
- Hubble, E. P. (1925). Cepheids in Spiral Nebulae. *Popular Astronomy*, 33.
- Hubble, E. P. (1926). Extragalactic nebulae. *ApJ*, 64.

- Hwang, C.-Y. and Chang, M.-Y. (2009). A Catalog of Morphologically Identified Merging Galaxies. *ApJS*, 181:233–237.
- Jurić, M., Ivezić, Ž., Brooks, A., Lupton, R. H., Schlegel, D., Finkbeiner, D., Padmanabhan, N., Bond, N., Sesar, B., Rockosi, C. M., Knapp, G. R., Gunn, J. E., Sumi, T., Schneider, D. P., Barentine, J. C., Brewington, H. J., Brinkmann, J., Fukugita, M., Harvanek, M., Kleinman, S. J., Krzesinski, J., Long, D., Neilsen, Jr., E. H., Nitta, A., Snedden, S. A., and York, D. G. (2008). The Milky Way Tomography with SDSS. I. Stellar Number Density Distribution. *ApJ*, 673:864–914.
- Klypin, A., Kravtsov, A. V., Valenzuela, O., and Prada, F. (1999). Where Are the Missing Galactic Satellites? *ApJ*, 522:82–92.
- Kron, R. G. (1980). Photometry of a complete sample of faint galaxies. *ApJS*, 43:305–325.
- Kroupa, P. (2001). On the variation of the initial mass function. *MNRAS*, 322:231–246.
- Kuiper, G. P. (1938). The Empirical Mass-Luminosity Relation. *ApJ*, 88:472.
- Leavitt, H. S. and Pickering, E. C. (1913). 25 New Variable Stars, Principally in Harvard Maps 39 and 45. *Harvard College Observatory Circular*, 179:1–4.
- Lee, Y. S., Beers, T. C., Sivarani, T., Allende Prieto, C., Koesterke, L., Wilhelm, R., Re Fiorentin, P., Bailer-Jones, C. A. L., Norris, J. E., Rockosi, C. M., Yanny, B., Newberg, H. J., Covey, K. R., Zhang, H.-T., and Luo, A.-L. (2008). The SEGUE Stellar Parameter Pipeline. I. Description and Comparison of Individual Methods. *AJ*, 136:2022–2049.
- Lemaitre, G. H. (1927). *The Gravitational Field in a Fluid Sphere of Uniform Invariant Density, According to the Theory of Relativity*. PhD thesis, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., Allende Prieto, C., Barkhouser, R., Bizyaev, D., Blank, B., Brunner, S., Burton, A., Carrera, R., Chojnowski, S. D., Cunha, K., Epstein, C., Fitzgerald, G., Garcia Perez, A. E., Hearty, F. R., Henderson, C., Holtzman, J. A., Johnson, J. A., Lam, C. R., Lawler, J. E., Maseman, P., Meszaros, S., Nelson, M., Coung Nguyen, D., Nidever, D. L., Pinsonneault, M., Shetrone, M., Smee, S., Smith, V. V., Stolberg, T., Skrutskie, M. F., Walker, E., Wilson, J. C., Zasowski, G., Anders, F., Basu, S., Beland, S., Blanton, M. R., Bovy, J., Brownstein, J. R., Carlberg, J., Chaplin, W., Chiappini, C., Eisenstein, D. J., Elsworth, Y., Feuillet, D., Fleming, S. W., Galbraith-Frew, J., Garcia, R. A., Anibal Garcia-Hernandez, D., Gillespie, B. A., Girardi, L., Gunn, J. E., Hasselquist, S., Hayden, M. R., Hekker, S., Ivans, I., Kinemuchi, K., Klaene, M., Mahadevan, S., Mathur, S., Mosser, B., Muna, D., Munn, J. A., Nichol, R. C., O’Connell, R. W., Robin, A. C., Rocha-Pinto, H., Schultheis, M., Serenelli, A. M., Shane, N., Silva Aguirre, V., Sobeck, J. S., Thompson, B., Troup, N. W., Weinberg, D. H., and Zamora, O. (2015). The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE). *ArXiv e-prints*.

- Majewski, S. R., Skrutskie, M. F., Weinberg, M. D., and Ostheimer, J. C. (2003). A Two Micron All Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. I. Morphology of the Sagittarius Core and Tidal Arms. *ApJ*, 599:1082–1115.
- Martin, D. C., Fanson, J., Schiminovich, D., Morrissey, P., Friedman, P. G., Barlow, T. A., Conrow, T., Grange, R., Jelinsky, P. N., Milliard, B., Siegmund, O. H. W., Bianchi, L., Byun, Y.-I., Donas, J., Forster, K., Heckman, T. M., Lee, Y.-W., Madore, B. F., Malina, R. F., Neff, S. G., Rich, R. M., Small, T., Surber, F., Szalay, A. S., Welsh, B., and Wyder, T. K. (2005). The Galaxy Evolution Explorer: A Space Ultraviolet Survey Mission. *ApJ*, 619:L1–L6.
- Marzke, R. O. and da Costa, L. N. (1997). The Galaxy Luminosity Function at $z=0.05$: Dependence on Color. *AJ*, 113:185.
- Mateo, M. L. (1998). Dwarf Galaxies of the Local Group. *ARA&A*, 36:435–506.
- Mather, J. C. (1982). The Cosmic Background Explorer /COBE/. *Optical Engineering*, 21:769–774.
- McConnachie, A. W., Irwin, M. J., Ferguson, A. M. N., Ibata, R. A., Lewis, G. F., and Tanvir, N. (2005). Distances and metallicities for 17 Local Group galaxies. *MNRAS*, 356:979–997.
- Meylan, G. (1987). Studies of dynamical properties of globular clusters. III - Anisotropy in Omega Centauri. *A&A*, 184:144–154.
- Mirabel, I. F., Dottori, H., and Lutz, D. (1992). Genesis of a dwarf galaxy from the debris of the Antennae. *A&A*, 256:L19–L22.
- Mo, H., van den Bosch, F. C., and White, S. (2010). *Galaxy Formation and Evolution*.
- Moore, B., Ghigna, S., Governato, F., Lake, G., Quinn, T., Stadel, J., and Tozzi, P. (1999). Dark Matter Substructure within Galactic Halos. *ApJ*, 524:L19–L22.
- Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A., and Oemler, A. (1996). Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies. *Nature*, 379:613–616.
- Moore, B., Lake, G., and Katz, N. (1998). Morphological Transformation from Galaxy Harassment. *ApJ*, 495:139–151.
- Newberg, H. J., Yanny, B., Rockosi, C., Grebel, E. K., Rix, H.-W., Brinkmann, J., Csabai, I., Hennessy, G., Hindsley, R. B., Ibata, R., Ivezić, Z., Lamb, D., Nash, E. T., Odenkirchen, M., Rave, H. A., Schneider, D. P., Smith, J. A., Stolte, A., and York, D. G. (2002). The Ghost of Sagittarius and Lumps in the Halo of the Milky Way. *ApJ*, 569:245–274.
- Norris, J. E., Freeman, K. C., and Mighell, K. J. (1996). The Giant Branch of omega Centauri. V. The Calcium Abundance Distribution. *ApJ*, 462:241.

- O'Leary, E. M. and Kartaltepe, J. S. (2013). Galaxy Merger Identification in the CANDELS GOODS-South Field. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #221*, volume 221 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 147.33.
- Peñarrubia, J., McConnachie, A., and Babul, A. (2006). On the Formation of Extended Galactic Disks by Tidally Disrupted Dwarf Galaxies. *ApJ*, 650:L33–L36.
- Peñarrubia, J., Pontzen, A., Walker, M. G., and Koposov, S. E. (2012). The Coupling between the Core/Cusp and Missing Satellite Problems. *ApJ*, 759:L42.
- Peacock, J. A., 2DF Galaxy Redshift Survey Team, Colless, M., Peacock, J., Baugh, C. M., Bland-Hawthorn, J., Bridges, T., Cannon, R., Cole, S., Collins, C., Couch, W., Cross, N., Dalton, G., Deeley, K., de Propris, R., Driver, S., Efstathiou, G., Ellis, R. S., Frenk, C. S., Glazebrook, K., Jackson, C., Lahav, O., Lewis, I., Lumsden, S., Maddox, S., Madgwick, D., Norberg, P., Percival, W., Peterson, B., Sutherland, W., and Taylor, K. (2001). Measuring Large-Scale Structure with the 2dF Galaxy Redshift Survey. In Cristiani, S., Renzini, A., and Williams, R. E., editors, *Deep Fields*, page 221.
- Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., Knop, R. A., Nugent, P., Castro, P. G., Deustua, S., Fabbro, S., Goobar, A., Groom, D. E., Hook, I. M., Kim, A. G., Kim, M. Y., Lee, J. C., Nunes, N. J., Pain, R., Pennypacker, C. R., Quimby, R., Lidman, C., Ellis, R. S., Irwin, M., McMahan, R. G., Ruiz-Lapuente, P., Walton, N., Schaefer, B., Boyle, B. J., Filippenko, A. V., Matheson, T., Fruchter, A. S., Panagia, N., Newberg, H. J. M., Couch, W. J., and Project, T. S. C. (1999). Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae. *ApJ*, 517:565–586.
- Pikel'Ner, S. B. (1965). Spiral Arms and Interacting Galaxies. *AZh*, 42:515.
- Press, W. H. and Schechter, P. (1974). Formation of Galaxies and Clusters of Galaxies by Self-Similar Gravitational Condensation. *ApJ*, 187:425–438.
- Quinn, P. J., Hernquist, L., and Fullagar, D. P. (1993). Heating of galactic disks by mergers. *ApJ*, 403:74–93.
- Renaud, F., Boily, C. M., Naab, T., and Theis, C. (2009). Fully Compressive Tides in Galaxy Mergers. *ApJ*, 706:67–82.
- Rood, H. J. (1965). *The Dynamics of the Coma Cluster of Galaxies*. PhD thesis, THE UNIVERSITY OF MICHIGAN.
- Rubin, V. C., Thonnard, N., and Ford, Jr., W. K. (1978). Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV - Systematic dynamical properties, SA through SC. *ApJ*, 225:L107–L111.
- Sandage, A. and Binggeli, B. (1984). Studies of the Virgo cluster. III - A classification system and an illustrated atlas of Virgo cluster dwarf galaxies. *AJ*, 89:919–931.
- Sargent, W. L. W. and Searle, L. (1970). Isolated Extragalactic H II Regions. *ApJ*, 162:L155.

- Schaye, J., Crain, R. A., Bower, R. G., Furlong, M., Schaller, M., Theuns, T., Dalla Vecchia, C., Frenk, C. S., McCarthy, I. G., Helly, J. C., Jenkins, A., Rosas-Guevara, Y. M., White, S. D. M., Baes, M., Booth, C. M., Camps, P., Navarro, J. F., Qu, Y., Rahmati, A., Sawala, T., Thomas, P. A., and Trayford, J. (2015). The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. *MNRAS*, 446:521–554.
- Schechter, P. (1976). An analytic expression for the luminosity function for galaxies. *ApJ*, 203:297–306.
- Schneider, P. (2006). *Extragalactic Astronomy and Cosmology*.
- Schweizer, F. (1978). Galaxies with long tails. In Berkhuijsen, E. M. and Wielebinski, R., editors, *Structure and Properties of Nearby Galaxies*, volume 77 of *IAU Symposium*, pages 279–284.
- Seibert, M., Martin, D. C., Heckman, T. M., Buat, V., Hoopes, C., Barlow, T., Bianchi, L., Byun, Y.-I., Donas, J., Forster, K., Friedman, P. G., Jelinsky, P., Lee, Y.-W., Madore, B. F., Malina, R., Milliard, B., Morrissey, P., Neff, S., Rich, R. M., Schiminovich, D., Siegmund, O., Small, T., Szalay, A. S., Welsh, B., and Wyder, T. K. (2005). Testing the Empirical Relation between Ultraviolet Color and Attenuation of Galaxies. *ApJ*, 619:L55–L58.
- Sérsic, J. L. (1963). Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 6:41.
- Shamir, L. and Wallin, J. (2014). Automatic detection and quantitative assessment of peculiar galaxy pairs in Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS*, 443:3528–3537.
- Shapley, H. (1918). Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. VII. The distances, distribution in space, and dimensions of 69 globular clusters. *ApJ*, 48.
- Skillman, E. D. (2005). The evolution of dwarf galaxies. *Escola de Inverno do Observatório Nacional, 2005*.
- Telles, E., Melnick, J., and Terlevich, R. (1997). The morphology of H II galaxies. *MNRAS*, 288:78–107.
- Thilker, D. A., Bianchi, L., Boissier, S., Gil de Paz, A., Madore, B. F., Martin, D. C., Meurer, G. R., Neff, S. G., Rich, R. M., Schiminovich, D., Seibert, M., Wyder, T. K., Barlow, T. A., Byun, Y.-I., Donas, J., Forster, K., Friedman, P. G., Heckman, T. M., Jelinsky, P. N., Lee, Y.-W., Malina, R. F., Milliard, B., Morrissey, P., Siegmund, O. H. W., Small, T., Szalay, A. S., and Welsh, B. Y. (2005). Recent Star Formation in the Extreme Outer Disk of M83. *ApJ*, 619:L79–L82.
- Toomre, A. and Toomre, J. (1972). Galactic Bridges and Tails. *ApJ*, 178:623–666.

- Torres-Flores, S., Mendes de Oliveira, C., de Mello, D. F., Amram, P., Plana, H., Epinat, B., and Iglesias-Páramo, J. (2009). Star formation in the intragroup medium and other diagnostics of the evolutionary stages of compact groups of galaxies. *A&A*, 507:723–746.
- Turner, D. G., Majaess, D. J., Lane, D. J., Rosvick, J. M., and Henden, A. A. B. D. D. (2010). The Galactic Calibration of the Cepheid Period-Luminosity Relation and its Implications for the Universal Distance Scale. *Odessa Astronomical Publications*, 23:119.
- Verdes-Montenegro, L., Del Olmo, A., Yun, M. S., and Perea, J. (2005). The evolution of HCG 31: Optical and high-resolution HI study. *A&A*, 430:443–464.
- Walsh, D., Carswell, R. F., and Weymann, R. J. (1979). 0957 + 561 A, B - Twin quasistellar objects or gravitational lens. *Nature*, 279:381–384.
- Weillbacher, P. M., Duc, P.-A., and Fritze-v. Alvensleben, U. (2003). Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies. II. Properties and kinematics of the ionized gas. *A&A*, 397:545–555.
- Weinberg, D. H., Davé, R., Katz, N., and Kollmeier, J. A. (2003). The Lyman- α Forest as a Cosmological Tool. In Holt, S. H. and Reynolds, C. S., editors, *The Emergence of Cosmic Structure*, volume 666 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 157–169.
- Wetzel, A. R., Tollerud, E. J., and Weisz, D. R. (2015). Rapid Environmental Quenching of Satellite Dwarf Galaxies in the Local Group. *ApJ*, 808:L27.
- Wetzstein, M., Naab, T., and Burkert, A. (2007). Do dwarf galaxies form in tidal tails? *MNRAS*, 375:805–820.
- Windhorst, R. A., Burstein, D., Mathis, D. F., Neuschaefer, L. W., Bertola, F., Buson, L. M., Koo, D. C., Matthews, K., Barthel, P. D., and Chambers, K. C. (1991). The discovery of a young radio galaxy at $Z = 2.390$ - Probing initial star formation at Z less than approximately 3.0. *ApJ*, 380:362–383.
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, Jr., J. E., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bakken, J. A., Barkhouser, R., Bastian, S., Berman, E., Boroski, W. N., Bracker, S., Briegel, C., Briggs, J. W., Brinkmann, J., Brunner, R., Burles, S., Carey, L., Carr, M. A., Castander, F. J., Chen, B., Colestock, P. L., Connolly, A. J., Crocker, J. H., Csabai, I., Czarapata, P. C., Davis, J. E., Doi, M., Dombeck, T., Eisenstein, D., Ellman, N., Elms, B. R., Evans, M. L., Fan, X., Federwitz, G. R., Fiscelli, L., Friedman, S., Frieman, J. A., Fukugita, M., Gillespie, B., Gunn, J. E., Gurbani, V. K., de Haas, E., Haldeman, M., Harris, F. H., Hayes, J., Heckman, T. M., Hennessy, G. S., Hindsley, R. B., Holm, S., Holmgren, D. J., Huang, C.-h., Hull, C., Husby, D., Ichikawa, S.-I., Ichikawa, T., Ivezić, Ž., Kent, S., Kim, R. S. J., Kinney, E., Klaene, M., Kleinman, A. N., Kleinman, S., Knapp, G. R., Korienek, J., Kron, R. G., Kunszt, P. Z., Lamb, D. Q., Lee, B., Leger, R. F., Limmongkol, S., Lindenmeyer, C., Long, D. C., Loomis, C., Loveday, J., Lucinio, R., Lupton, R. H., MacKinnon, B., Mannery, E. J., Mantsch, P. M., Margon, B., McGehee, P., McKay, T. A., Meiksin, A., Merelli, A., Monet, D. G., Munn, J. A., Narayanan, V. K.,

- Nash, T., Neilsen, E., Neswold, R., Newberg, H. J., Nichol, R. C., Nicinski, T., Nonino, M., Okada, N., Okamura, S., Ostriker, J. P., Owen, R., Pauls, A. G., Peoples, J., Peterson, R. L., Petravick, D., Pier, J. R., Pope, A., Pordes, R., Prosapio, A., Rechenmacher, R., Quinn, T. R., Richards, G. T., Richmond, M. W., Rivetta, C. H., Rockosi, C. M., Ruthmansdorfer, K., Sandford, D., Schlegel, D. J., Schneider, D. P., Sekiguchi, M., Sergey, G., Shimasaku, K., Siegmund, W. A., Smee, S., Smith, J. A., Snedden, S., Stone, R., Stoughton, C., Strauss, M. A., Stubbs, C., SubbaRao, M., Szalay, A. S., Szapudi, I., Szokoly, G. P., Thakar, A. R., Tremonti, C., Tucker, D. L., Uomoto, A., Vanden Berk, D., Vogeley, M. S., Waddell, P., Wang, S.-i., Watanabe, M., Weinberg, D. H., Yanny, B., Yasuda, N., and SDSS Collaboration (2000). The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *AJ*, 120:1579–1587.
- Zwicky, F. (1933). Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6:110–127.
- Zwicky, F. (1956). Multiple Galaxies. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*, 29:344–385.
- Zwicky, F. (1962). Supernovae and Chains of Supernovae as Launchers of Stars and Galaxies. *PASP*, 74:70.