

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

Formação Estelar em Galáxias Early–Type No Aglomerado  
de Coma

Autor:

Douglas Brambila dos Santos

Orientadores:

Paulo Afrânio Augusto Lopes

Laurie Riguccini

Projeto de Conclusão de Curso para a obtenção do título de  
Astrônomo

2018

*Dedicado aos meus pais, meus alicerces.*

*Coelorum perrupit claustra. (Ele rompeu as barreiras do céu)*

Epitáfio de William Herschel

# *Agradecimentos*

Meus mais profundos agradecimentos vão aos meus pais, pois sem o amor, carinho e incentivo destes dois eu jamais teria completado esta jornada. Me lembro das palavras de meu pai na noite em que contei que tinha conseguido uma vaga para Bacharelado em Astronomia na UFRJ: "Esse é o seu desejo? Se for, farei tudo ao meu alcance para que consiga realizar". E fez. Mesmo durante apertos e dificuldades financeiras, aqui estou. Jamais conseguirei retribuí-los. Outras pessoas fundamentais para essa conquista foram meu irmão Peterson, minha irmã Tainara, minhas tias Ester e Nilza, meu tio José, meu avô Orlando, minha avó Nita, minha avó Neuza e principalmente meu falecido avô Francisco, uma das pessoas mais carinhosas e amorosas que eu já conheci e que eu tive o privilégio de chamar de vô. A todos vocês, meus mais profundos agradecimentos e minha eterna gratidão.

Também gostaria de agradecer aos professores que abriram minha mente para a possibilidade do ensino superior: prof. Carlão e o prof. Fernando do E.E. Culto à Ciência. Sem o incentivo destes dois, eu provavelmente não teria prestado os vestibulares. Além deles, gostaria de agradecer todos os outros professores que contribuíram para minha educação, desde o início até o presente momento, principalmente os professores do Observatório do Valongo que sempre foram muito dedicados e atenciosos. Também dedico um agradecimento especial aos professores do **Cursinho Popular Triu** em Campinas-SP, que desde o início dos anos 2000 lutam pela popularização da universidade pública.

Quero agradecer também aos meus orientadores, Paulo e Laurie, por tudo o que me ensinaram e ensinam. Sempre estiveram presentes para me auxiliar, e no momento mais difícil da minha graduação eles estiveram presentes com palavras amigas e conselhos. Obrigado!

Por fim e não menos importante, quero agradecer a todos os meus amigos, em especial aos da casa WARD: Walner, Alex e Renan que aguentaram morar com essa pessoa que no começo não sabia nem preparar um miojo. Um agradecimento especial também a@s meus amig@s Aline, Bruno, Camila, Maria, Yanna e todos os demais que mesmo não citados nominalmente desempenharam um papel importante nesta conquista. Um agradecimento também para aqueles que fizeram do ensino médio um lugar suportável e até agradável: Graziella, Nelson e Taiana.

Quero agradecer a todos aqueles que 6 meses atrás vieram me dizer que uma reprovação não me definia, e que acreditaram na minha capacidade. Muito obrigado! Também agradeço a todos que já me deram café. Vocês me ajudaram muito, mesmo.

## *Resumo*

### **Formação Estelar em Galáxias Early - Type No Aglomerado de Coma**

por Douglas Brambila dos Santos

De uma maneira simples, podemos classificar galáxias em dois grupos distintos, galáxias Early–Type (ETGs) e galáxias Late–Type (LTGs). Nestes dois grupos, destaca–se como características a cor avermelhada, a baixa presença de gás e poeira e a ausência de formação estelar para as ETGs. Já para as LTGs, desta–se a cor azulada, a forte presença de gás e poeira e elevadas taxas de formação estelar. Entretanto, esta é uma forma simplificada de se entender a natureza das galáxias, existindo galáxias que não se enquadram nestas definições.

Neste trabalho, desenvolvemos um método para selecionar ETGs que apresentam alta taxa de formação estelar. Essa forte presença de formação estelar indica que estas galáxias muito provavelmente estão passando por uma transição, e portanto representam um grupo de estudo interessante para o entendimento dos processos evolutivos das galáxias. Para tanto, utilizamos uma amostra de 132 galáxias no aglomerado de Coma, sendo 32 ETGs e 102 Não–ETGs. A formação estelar foi determinada usando um razão de luminosidades no IR ( $L_{22\mu m}/L_{3.4\mu m}$ ) provenientes do *Widefield Infrared Survey Explorer* (WISE). A classificação morfológica foi feita usando uma combinação de parâmetros fotométricos provenientes do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS): ETGs possuem  $\text{fracDeV} \geq 0.8$  e  $C \geq 2.6$ . Apresentamos como resultado 6 ETGs no aglomerado de Coma que possuem alta taxa de formação estelar. Estas galáxias são chamadas de MIEGs (Mid-IR Enhanced Galaxies).

## *Abstract*

### **Star Formation In Early-Type Galaxies In The Coma Cluster**

by Douglas Brambila dos Santos

In a simple way, we can classify galaxies in two distinct groups, Early–Type Galaxies (ETGs) and Late–Type Galaxies (LTGs). In these two groups, the main characteristics for the ETGs are the reddish color, the low presence of dust and gas, and the absence of star formation. While for the LTGs, stands out the bluish color, the strong presence of dust and gas, and the high star formation rates. However, this is a simple way to understand the nature of the galaxies, and there are galaxies that do not fit in any one of these definitions.

In this work, we developed a methodology to select ETGs that show a high star formation rate. The strong presence of star formation indicate that these galaxies are most likely going through a morphological transition phase, and because of that they represent a very interesting group for the understanding of the evolutionary processes of the galaxies. To do that, we use a sample containing 132 galaxies on the Coma cluster. Of these 132, 32 are ETGs and 102 are Non–ETGs. The star formation was estimated using a luminosity ratio in the IR ( $L_{22\mu m}/L_{3.4\mu m}$ ) provided by the Widefield Infrared Survey Explorer (WISE). The morphological classification was determined using a combination of photometric parameters provided by the Sloan Digital Sky Survey (SDSS): ETGs have  $\text{fracDeV} \geq 0.8$  and  $C \geq 2.6$ . Our main result is the discovery of 6 ETG galaxies in the Coma cluster that have a high star formation rate. These galaxies are called MIEGs (Mid-IR Enhanced Galaxies).

# Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Sumário	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xi
Abreviações	xii
Constantes Físicas	xiii
Símbolos	xiv
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 O Grande Debate . . . . .	2
1.2 Classificação Morfológica . . . . .	3
1.2.1 Diagrama de Hubble . . . . .	3
1.2.2 Propriedades das Galáxias . . . . .	5
1.3 Galáxias em Transição . . . . .	8
<b>2 Dados</b>	<b>11</b>
2.1 Origem . . . . .	12
2.1.1 SDSS . . . . .	12
2.1.2 WISE . . . . .	13
<b>3 Metodologia</b>	<b>15</b>
3.1 Seleção de Fontes . . . . .	16
3.2 Determinação Morfológica . . . . .	17
3.2.1 FracDeV . . . . .	18
3.2.2 Concentração . . . . .	20
3.3 Análise por Massa . . . . .	21

---

3.4	Relação entre $L_{22 \mu m}$ e $L_{3.4 \mu m}$ . . . . .	24
3.5	Separação Por Gaussianas . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b>	<b>35</b>
<b>A</b>	<b>Seleção Única Para Múltiplos Aglomerados</b>	<b>38</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>41</b>



# Lista de Figuras

1.1	<i>Hubble Turning Fork Diagram</i> . Temos a exemplificação do sistema de classificação introduzido por Hubble, e usado até hoje. Galáxias E0–E7 são galáxias Elípticas. Recebem também a nomenclatura de <i>Early–Type</i> . Galáxias Sa,b,c e SBa,b,c são galáxias Espirais, Normais e Barradas respectivamente. Recebem também a nomenclatura de <i>Late–Type</i> . Imagem retirada de: <a href="http://www.spacetelescope.org">www.spacetelescope.org</a> . . . . .	5
1.2	Imagem exemplificando o processo de formação monolítico. As primeiras estruturas do universo se formariam a partir de nuvens únicas. Com o passar do tempo, a formação estelar e o feedback de supernovas consumiria e expulsaria, respectivamente, o gás presente na galáxia, tornado—a uma galáxia com população estelar envelhecida e pobre em gás . Imagem retirada de: <a href="https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-formation-of-the-galaxy/">https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-formation-of-the-galaxy/</a> . . . . .	6
1.3	Imagem exemplificando o processo de agrupamento hierárquico. As primeiras estruturas do universo seriam pequenas e de baixa massa, e objetos maiores seriam resultados das fusões entre objetos pequenos e de baixa massa. Imagem retirada de: <a href="http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hierarchical+Clustering">http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hierarchical+Clustering</a> . . . . .	7
1.4	Imagem extraída de Schawinski et al. (2014). Na parte de baixo do gráfico temos a Nuvem Azul, habitada pelas LTGs. Na parte Superior temos a Sequência Vermelha, habitada por ETGs. Entre o pico de densidade desses dois grupos está o <i>Green Valley</i> , habitado por galáxias com aparência híbrida. . . . .	9
2.1	Imagem representando toda a área coberta por observações do SDSS no Hemisfério Sul Galáctico. Junto com a Figura 2.2 mostra a riqueza das observações e a capacidade de cobrir grande parte do céu. . . . .	12
2.2	Imagem representando toda a área coberta por observações do SDSS no Hemisfério Norte Galáctico. Junto com a Figura 2.1 mostra a riqueza das observações e a capacidade de cobrir grande parte do céu. . . . .	13
3.1	Representação dos dois perfis ideais possíveis, o perfil que segue a <i>lei de de Vaucouleurs (em marrom)</i> , para galáxias ETGs, Equação 3.2, e o perfil que segue a <i>lei exponencial (em azul)</i> , para galáxias LTGs, Equação 3.4. E tem—se, também, o perfil de <i>uma galáxias qualquer (em laranja)</i> , que segue uma combinação dos dois perfis idealizado. imagem retirada de: <a href="http://inspirehep.net/record/821528/plots">http://inspirehep.net/record/821528/plots</a> . . . . .	19

- 3.2 Representação dos raios que delimitam as diferentes porcentagens do fluxo Petrosianos. Em nosso caso, estamos interessados nos raios que contem 90% e 50% do fluxo. Imagem retirada de: [http://spiff.rit.edu/classes/phys443/lectures/gal\\_1/petro/petro.html](http://spiff.rit.edu/classes/phys443/lectures/gal_1/petro/petro.html) . . . . . 21
- 3.3 Imagens da seleção aleatória feita para as Não-ETGs. Cada linha representa um *bin*. A primeira linha é o *bin* 1, a segunda linha é o *bin* 2, etc. Apesar de nossa seleção não se preocupar em definir galáxias LTG, pode-se notar que, de maneira geral, as galáxias rejeitadas pelo critério de seleção ( $\text{fracDeV} \geq 0.8$  e  $\text{conc} \geq 2.6$  são objetos espirais). . . . . 22
- 3.4 Imagem da seleção aleatória feita para as ETGs. Cada linha representa um *bin*. A primeira linha é o *bin* 1, a segunda linha é o *bin* 2, etc. É fácil notar que as galáxias nas três primeiras linhas,  $10^8 M_{\odot} \leq M_{\text{tot}} \leq 10^{10} M_{\odot}$ , são objetos pequenos, e portanto difíceis de se tirar conclusões visualmente. Pode-se notar que a terceira galáxia da quarta linha possui o que parecem ser braços espirais, mas a qualidade da imagem não é muito boa para uma certeza na afirmação. . . . . 23
- 3.5 Benzeno(a)pireno é um exemplo de PAH. O Benzeno(a)pireno é um mutagênico cancerígeno que pode ser encontrado em gases de exaustão. PAH são uma classe de moléculas orgânicas que podem ser encontrados em muitas formas e em diversas condições, tanto na Terra quando fora dela. . . . . 25
- 3.6 Relação entre  $L_{22\mu\text{m}}/L_{3.4\mu\text{m}}$  indicando a taxa de formação estelar em função da massa estelar ( $L_{3.4\mu\text{m}}$ ) para o aglomerado de Coma. Pontos vermelhos são ETG e os azuis são Não-ETG. . . . . 26
- 3.7 Distribuição de  $\text{Log}(L_{22\mu\text{m}}/L_{3.4\mu\text{m}})$  para as 134 galáxias presentes em nossa amostra. Em azul temos as Não-ETGs, com 102 galáxias e em vermelho temos as ETGs, com 32 galáxias. Em tracejado temos o ponto em que as duas gaussianas se interceptam, em  $\text{Log}(L_{22\mu\text{m}}/L_{3.4\mu\text{m}}) = 32.915$ . Desse modo, a linha tracejada separa MIEGs de ETGs regulares (ou objetos com alta taxa de formação estelar de galáxias passivas). . . . . 27
- 4.1 Relação entre  $L_{22\mu\text{m}}/L_{3.4\mu\text{m}}$  indicando a taxa de formação estelar em função da massa estelar ( $L_{3.4\mu\text{m}}$ ) para o aglomerado de Coma. Pontos azuis são galáxias que não se enquadram na classificação morfológica do grupo ETG e portanto recebem a nomenclatura de Não-ETG. Pontos vermelhos são galáxias ETG. Triângulos pretos são galáxias ETGs classificadas como MIEGs no presente trabalho. Quadrados verdes são as MIEGs de Riguccini et al. (2015) presentes em nossa amostra. A linha tracejada é a linha em que as gaussianas que representam as duas populações se interceptam (ver Figura 3.7). . . . . 29
- 4.2 Imagens do SDSS das MIEGs encontradas no presente trabalho. Na primeira linha temos, da esquerda para a direita: 1, 2; na segunda linha temos, da esquerda pra a direita: 3, 4; na terceira linha temos, da esquerda para a direita: 5, 6. Apesar de visualmente parecer que a galáxia 4 está em processo de fusão, o que explicaria sua alta taxa de formação estelar, as duas galáxias da imagem possuem redshift bem diferentes, e portanto não estão se fundindo. . . . . 30

4.3	Espectros do SDSS das MIEGs encontradas no presente trabalho. Na primeira linha temos, da esquerda para a direita: 1, 2; na segunda linha temos, da esquerda pra a direita: 3, 4; na terceira linha temos, da esquerda para a direita: 5, 6. Note que nenhum dos espectros se comportam como o espectro de um ETG típica, mas sim como o de uma LTG típica (Figura 4.6). . . . .	31
4.4	Imagens do SDSS para as MIEGs de Riguccini et al. (2015). Na primeira linha temos, da esquerda para a direita: C1, C2, C3; na segunda linha temos, da esquerda pra a direita: C4, C5, C8; na terceira linha temos, da esquerda para a direita: C9 e C10 . . . . .	32
4.5	Espectros do SDSS para as MIEGs de Riguccini et al. (2015). Na primeira linha temos, da esquerda para a direita: C1, C2; na segunda linha temos, da esquerda pra a direita: C3, C4; na terceira linha temos, da esquerda para a direita: C5, C8; na quarta lina temos, da esquerda para a direita: C9, C10. Note que nenhum dos espectros se comportam como o de uma ETG típica (Figura 4.6) . . . . .	33
4.6	Imagens e espectros de ETG e LTG típicas, respectivamente. Note que se compararmos os espectros com os das MIEGs, Figura 4.5, teremos um espectro semelhante ao de uma LTG típica, enquanto seus parâmetros fotométricos indicam que são galáxias <i>Early – Type</i> . . . . .	34
5.1	Diagrama de sSFR vs $M_{estelar}$ onde podemos ver que nossas MIEGs apresentam uma taxa de formação estelar diferenciada do grupo principal de ETGs. A vantagem de se utilizar sSFR é possuir uma amostra mais completa do que a que tínhamos com o WISE. Em adição as 6 ETGs em transição que foram previamente detectadas, podemos ver que existem outras ETGs que estão destacadas do grupo principal e que portanto são boas candidatas ao posto de ETGs em transição. . . . .	37
A.1	Separação das amostra. No primeiro painel temos as galáxias pertencentes a aglomerados e no segundo painel temos as galáxias pertencentes ao campo. As galáxias acima da linha tracejada são fontes que pertencem a amostra de Alta Luminosidade. As galáxias a esquerda da linha sólida são as fontes que pertencem a amostra de Baixo Redshift. Essas separações são feita para remover a incompletude na da amostra na região abaixo da linha tracejada e a direita da linha sólida. . . . .	39
A.2	Relação entre $L_{22\mu m}/L_{3.4\mu m}$ para as amostras Alta Luminosidade (a direita) e para as amostras de Baixo Redshift (a esquerda). Note que em ambos os casos, as ETGs de aglomerados (pontos vermelhos) e as ETGs de campo (pontos azuis) se se espalham pelo gráfico como um todo, sem se agruparem em uma região preferencial, impedindo que uma seleção de MIEGs seja feita. . . . .	40

# Lista de Tabelas

4.1	Tabela contendo os dados das MIEGs apresentadas nesse trabalho. Note que todas as MIEGs possuem $\text{fracDev} \geq 0.8$ e $C \geq 2.6$ . . . . .	31
-----	--	----

# Abreviações

**ETG:** Galáxia Early–Type

**LTG:** Galáxia Late–Type

**SDSS:** Sloan Digital Sky Survey

**WISE:** Wide–field Infrared Survey Explorer

**MIEGs:** Mid-IR Enhanced Galaxies

**fracDeV:** Fração do perfil de brilho que segue a lei de de Vaucouleurs

**C:** Concentração do brilho da região central

**SFR:** Taxa de Formação Estelar

**sSFR:** Taxa de Formação Estelar Específica

# Constantes Físicas

Constant Name	Symbol	=	Constant Value (with units)
Massa do Sol	$M_{\odot}$	=	$1.989 \times 10^{30}$ Kg

# Símbolos

Símbolo	Grandeza	Unidade
$M_{\odot}$	Massa do Sol	Kg

# Capítulo 1

## Introdução

Galáxias são objetos de estudo da astronomia a um tempo bem curto se formos comparar com a idade da ciência astronômica e de seus outros objetos de estudo tradicionais, tais como estrelas e o sistema solar. No entanto, recentemente a quantidade de astrônomos e de investimentos que estão sendo colocados à disposição para o estudo de galáxias têm aumentado anualmente. Mas porque esses objetos despertam tamanha curiosidade à comunidade científica e civil? Para entendermos temos de primeiro entender o que são tais objetos e porque são tão importantes para a astronomia.

Então, o que é uma galáxia? É um corpo composto de matéria gasosa, estrelas, poeira e matéria escura, onde todos esses componentes são mantidos juntos através da força gravitacional. Assim como a existência de outros planetas e estrelas similares aos nossos, a existência de galáxias não foi algo que sempre existiu na consciência coletiva da sociedade. Pelo contrário, dos primórdios da civilização ao início do século passado, sempre se pensou que a Terra, depois o Sol e depois a Galáxia, eram objetos únicos e especiais. É quase inconcebível para nós, que nascemos com a ideia de um universo tão vasto, imaginar como seria para aqueles que antecederam essa descoberta de vastidão o quão especial a Terra seria. No entanto a ciência tem destruído a ideia de que somos especiais dia após dia.

Esse desmonte em nossa posição especial foi acontecendo século após século. Primeiro com a descoberta de que nosso planeta não é o centro do nosso Sistema Solar, depois que nosso Sol não é o centro da nossa Galáxia e depois que nossa Galáxia não é o Universo, mas sim uma parte ínfima do mesmo. Nos falta apenas descobrir vida



fora da Terra para que nossa última posição especial seja removida e nos tornemos completamente ordinários.

Com os telescópios modernos a percepção de que nosso planeta, estrela e galáxia não são únicos é facilmente adquirida, mas isso é fruto de séculos de evolução tecnológica e conceitos científicos. Antes da década de 1930 já se sabia que nós não habitamos o centro do universo, mas ainda não se sabia com certeza o quão vasto ele o é. Entre as décadas de 1910 e 1930 um debate surgiu na comunidade astronômica, e acabou com a concepção de que nossa Galáxia era única.

## 1.1 O Grande Debate

A partir do século XVII, com o aprimoramento dos telescópios, alguns objetos que não se assemelhavam a objetos pontuais como as estrelas passaram a ser detectados. Como eram objetos extensos e difusos eles foram chamados de “Nebulosas”. A natureza desses objetos levantou um debate na comunidade astronômica.

O que hoje é conhecido como “O Grande Debate”, foi uma exposição de ideias opostas que visavam explicar a natureza das “Nebulosas”. O que se debatia na época eram duas visões:

- **Harlow Shapley** (1885 – 1972) foi um astrônomo americano que afirmava que a Galáxia era tão grande que não importava o quão distante as Nebulosas estivessem, elas estavam dentro dos limites físicos da Galáxia.
- **Heber Curtis** (1872–1942), outro astrônomo americano, defendia a ideia oposta. Ele afirmava que não importava o quão longe as fronteiras físicas da Galáxia se estendia, ela não abrangeria o universo inteiro e algumas das Nebulosas provavelmente estariam fora das fronteiras da Galáxia.

Com a descoberta da Relação Período–Luminosidade por Henrietta Leavitt Leavitt (1908), tornou-se possível calcular a distância de objetos através de estrelas variáveis Cefeidas. Cefeidas são estrelas que possuem uma variação de brilho regular causada pela variação do raio da estrela. Usando a técnica de Henrietta, Shapley calculou que a Galáxia teria aproximadamente 300.000 anos–luz de diâmetro (atualmente

sabemos que o tamanho é na verdade de 100.000 anos-luz) e afirmava que as Nebulosas estavam nas periferias da Galáxia. Curtis refutava tais valores e as afirmações de Shapley. Curtis acreditava que o método de determinação de distâncias pelas Cefeidas ainda era muito impreciso. O mais irônico de tudo foi que Edwin Hubble (1899–1953), também americano, determinou em 1923 que a variação de brilho de Cefeidas na Nebula de Andrômeda, que posteriormente seria conhecida como uma galáxia vizinha, indicava uma distância de 900.000 anos–luz pela própria tabela de Shapley.

Diante de tais resultados, Shapley admite que estava equivocado quando a natureza das Nebulosas e a escala do universo. Com isso, temos o início do mais novo ramo da astronomia, a Astronomia Extragaláctica.

## 1.2 Classificação Morfológica

### 1.2.1 Diagrama de Hubble

Assim que as galáxias começaram a serem detectadas iniciou-se um esforço para separá-las em grupos baseados em suas características morfológicas. Essas primeiras tentativas foram feitas pelo astrônomo inglês William Herschel (1738 – 1822) já no fim de sua vida, e seu filho John Herschel (1792 – 1871). Em 1864 John Herschel (Herschel, 1864) publicou o *The General Catalogue of Nebulae*, um catálogo contendo 5097 objetos, sendo 4630 deles descobertos por pai e filho. A classificação por morfologia, ou seja, pela separação em grupos baseadas nas características físicas visíveis, é algo comum na ciência (fungos e micro–organismos, ossos, músculos, rochas, etc.). Ela permite agrupar objetos sem que se precise possuir um conhecimento profundo desses objetos.

Alguns anos depois do fim do Grande Debate, Hubble propôs um sistema de classificação morfológica, Hubble (1926), para os objetos extragalácticos baseando-se em imagens fotográficas. Em seu artigo ele propõe uma classificação em três grupos:

- **Elípticas (E):** Objetos que variam entre circulares e elípticos, sem indicação de estruturas complexas e cuja luz diminui suavemente do centro para as bordas indefinidas.

- **Espirais Normais (S):** Diferentemente das Elípticas, as Espirais Normais apresentam estruturas proeminentes chamadas de braços espirais que emergem de pontos opostos da periferia do núcleo da galáxia.
- **Espirais Barradas (SB):** Assemelham-se as Espirais Normais, mas possuem uma região em forma de barra no núcleo. Nessas galáxias, os braços emergem dessa região barrada, e não diretamente da periferia do núcleo.

Além dessa classificação mais generalizada em três grupos, Hubble subdividiu cada um dos grupos para criar uma classificação mais detalhada (Figura 1.1). Ele subdividiu as galáxias Elípticas em um sistema numeral indo de E0 a E7. Quanto mais perto de 0 menor a elipticidade da galáxia e quanto mais perto de 7 maior a elipticidade da galáxia. Para as Espirais Normais ele identificou três grupos de objetos e os classificou como Sa, Sb e Sc. Onde 'a', 'b' e 'c' determinam a compactidade dos braços espirais. Galáxias Sa possuem os braços mais compactados ao redor do núcleo e galáxias Sc possuem braços bem soltos ao redor do núcleo. Para as Espirais Barradas a separação é igual a das Espirais Normais.

Posteriormente a publicação de Hubble, galáxias S0, também conhecidas como Lenticulares, foram observadas (por Hubble e outros astrônomos). Esse objeto foi adicionado pelo astrônomo Allan Sandage em seu livro *The Hubble Atlas of Galaxies*, publicado em 1961. Estas galáxias foram colocadas região central do diagrama de Hubble, separando as galáxias Elípticas e Espirais, por causa das suas características físicas. Esses objetos apresentam um bojo central muito brilhante (semelhantemente às galáxias elípticas) e também são envoltas em uma estrutura extensa que se assemelha a um disco, no entanto esse disco não possui uma estrutura espiral e nem formação estelar elevada como nas galáxias espirais.

Esse sistema de classificação gerou o diagrama morfológico de Hubble, conhecido como *Hubble Turning Fork Diagram*. Junto com essa classificação, Hubble fez ainda mais uma distinção entre estes objetos. Ele chamou os objetos a direita do diagrama de *Late-Type* (Tipo Tardio, em português) os objetos a esquerda do diagrama de *Early-Type* (Tipo Anterior, em Português). Essa nomenclatura veio da crença de Hubble de que esse diagrama representava uma sequência evolutiva. As galáxias se formariam como Elípticas e com o passar do tempo se tornariam galáxias Espirais. O conhecimento atual

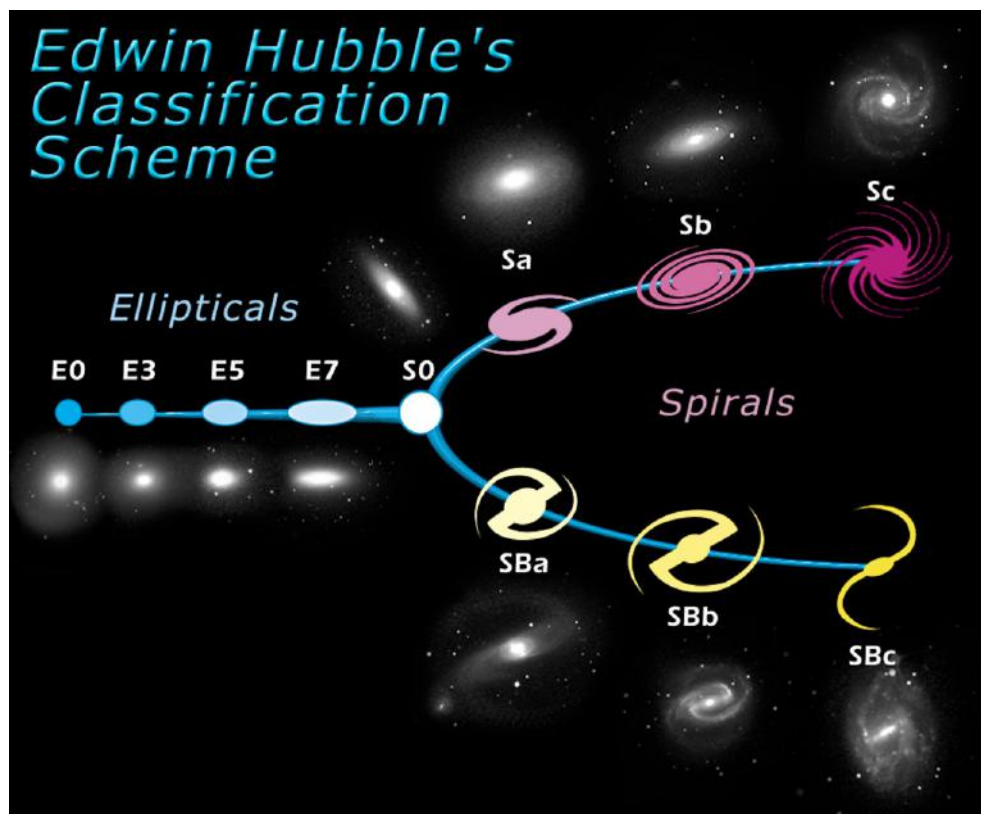


FIGURA 1.1. *Hubble Turning Fork Diagram*. Temos a exemplificação do sistema de classificação introduzido por Hubble, e usado até hoje. Galáxias E0–E7 são galáxias Elípticas. Recebem também a nomenclatura de *Early–Type*. Galáxias Sa,b,c e SBa,b,c são galáxias Espirais, Normais e Barradas respectivamente. Recebem também a nomenclatura de *Late–Type*. Imagem retirada de: [www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

sustenta a suposição oposta ao que foi proposto por Hubble. As galáxias se formam como Espirais e com o tempo se tornam Elípticas.

### 1.2.2 Propriedades das Galáxias

Para além das diferenças morfológicas apresentadas anteriormente, existem diferenças características em cada um dos grupos, *Early–Type* (**ETG**) e *Late–Type* (**LTG**).

- **ETG:** além da ausência de braços espirais, essas galáxias não possuem poeira, ou possuem em uma quantidade muito pequena. Possuem uma população antiga, uma cor avermelhada, ausência de gás e como consequência uma inexistente, ou uma quantidade ínfima, de formação estelar (e.g., Kormendy & Djorgovski, 1989; Faber, 1973).

- **LTG:** essas galáxias, além dos braços espirais, possuem uma grande quantidade de poeira e gás, uma cor azulada, uma população jovem e formação estelar (Blanton & Moustakas, 2009).

Tais diferenças provavelmente são provenientes das características de nascimento e evolução das galáxias. Atualmente, existem duas teorias aceitas, e sustentadas por observação, que explicam o processo de nascimento e evolução das galáxias, principalmente das ETGs: o processo **Monolítico** (Figura 1.2) e o processo **Agrupamento Hierárquico** (Figura 1.3).

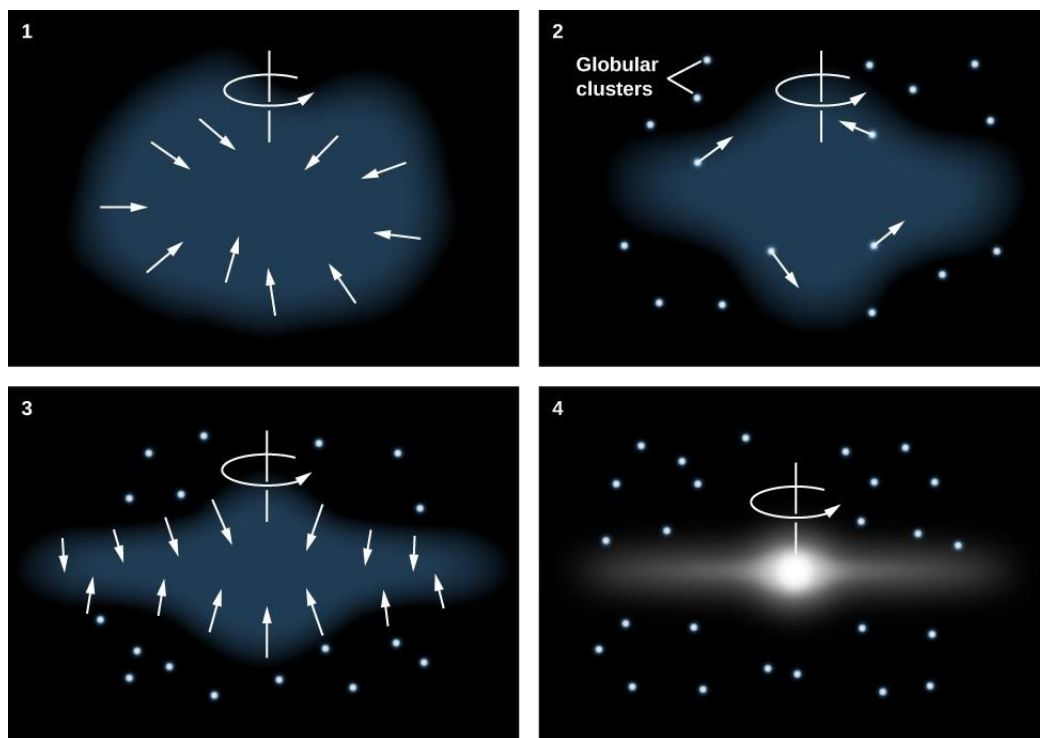


FIGURA 1.2. Imagem exemplificando o processo de formação monolítico. As primeiras estruturas do universo se formariam a partir de nuvens únicas. Com o passar do tempo, a formação estelar e o feedback de supernovas consumiria e expulsaria, respectivamente, o gás presente na galáxia, tornando-a uma galáxia com população estelar envelhecida e pobre em gás. Imagem retirada de: <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-formation-of-the-galaxy/>

O processo Monolítico afirma que as grandes estruturas presentes no Universo, galáxias inclusas, são frutos do colapso de enormes nuvens moleculares em grandes redshifts. Isso implicaria que galáxias ETGs presentes no universo local teriam se formado no início da formação do universo e evoluído através de processo físicos internos. E portanto, o que explicaria a diferença entre galáxias LTG e galáxias ETG seria a diferença entre os redshifts de formação. Estrelas de grande massa se formariam logo no início da formação da galáxias. Tais estrelas evoluem muito rapidamente, e retornam

material enriquecido ao meio ambiente, que em algum momento se juntam e formam novas estrelas, desta vez de menores massa, com maior metalicidade, e portanto uma cor mais avermelhada. Com o passar do tempo, tais galáxias se tornam vermelhas, com uma população envelhecida e desprovidas de gás e poeira.

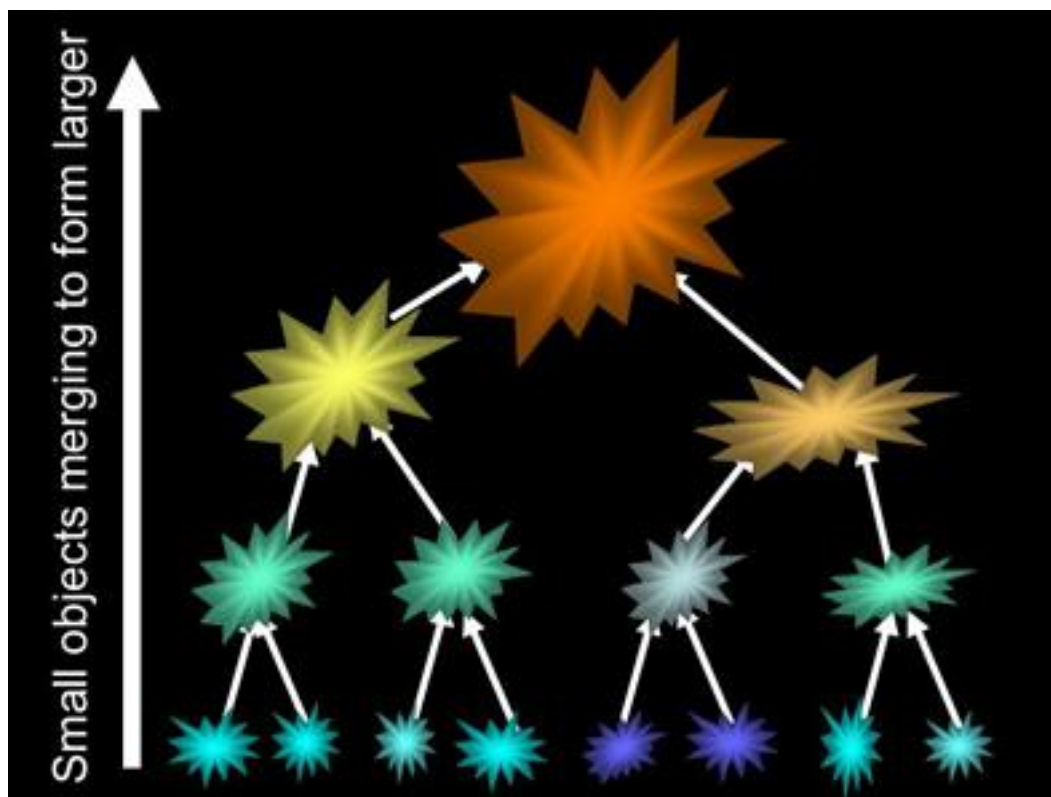


FIGURA 1.3. Imagem exemplificando o processo de agrupamento hierárquico. As primeiras estruturas do universo seriam pequenas e de baixa massa, e objetos maiores seriam resultados das fusões entre objetos pequenos e de baixa massa.

Imagem retirada de: <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hierarchical+Clustering>

Já o processo de Agrupamento Hierárquico afirma que estruturas de grande massa seriam o resultado da junção de objetos de pequena massa, como exemplificado na Figura 1.3. Pequenos grupos de gás e estrelas se juntariam para formar pequenas galáxias, que em seguida se juntariam com outros corpos de baixa massa formando um corpo de massa maior, e assim por diante até que galáxias, grupos, aglomerados e a estrutura em larga escala o Universo como um todo estivesse formada. Neste contexto, objetos ricos em gás se fundiriam para formar objetos maiores, essa fusão causaria grande perturbações no gás presente nos dois corpos causando assim um surto de formação estelar. Com o passar do tempo, e com constantes fusões, essas pequenas galáxias se tornariam as galáxias ETG do universo local, tendo pouco gás e poeira, baixa formação estelar, cor avermelhada e população estelar envelhecida.

Usar apenas uma das duas teorias para explicar as estruturas em grande escala do Universo provê uma resposta incompleta. Isso porque temos observações que sustentam ambas as teorias, como a presença de ETG em regiões de Campo, isto é, isoladas da estrutura em grande escala do Universo, que confirma a teoria Monolítica. E também a observação de *Wet Mergers*, isto é, fusão entre objetos ricos em gás passando por surtos de formação estelar.

### 1.3 Galáxias em Transição

Todas as propriedades apresentadas na subseção anterior são consequências dos processos de formação e evolução das galáxias. Mas existem alguns objetos que não se enquadram muito bem em nenhuma das definições apresentadas anteriormente, tais como galáxias "E+A" (Dressler & Gunn, 1983), *Green Valley Galaxies* (GV) (e.g., Coil et al., 2008; Salim et al., 2009), *luminous compact blue galaxies* (LCBGs) (Koo et al., 1994), *Mid-IR Enhanced Galaxies* (MIEGs) (Riguccini et al., 2015), as próprias galáxias S0 citadas na sessão anterior, entre outras. Esse objetos, apesar de muitas vezes terem a aparência de uma ETG, possuem características físicas que as colocariam no grupo LTG apesar de sua aparência física não ser a de uma LTG.

Galáxias "E+A" são galáxias em que seus espectros apresentam uma forte absorção nas linhas de Balmer, mas emissões insignificantes de [OII]. As linhas de Balmer são aquelas que acontecem quando o elétron de um átomo de Hidrogênio passa de um nível energético com número quântico alto para o nível quântico 2 (estado menos energético depois do estado fundamental). Essas transições indicam uma forte presença de estrelas de tipo espectral "A" (relativamente jovens e com massa variando entre  $1.4 M_{\odot} \leq M \leq 2.1 M_{\odot}$ ), o que evidencia uma significativa formação estelar recente. Estrelas de tipo espectral "B" e "O", que possuem um intervalo de massa de  $2.1 M_{\odot} \leq M \leq 16 M_{\odot}$  e  $M \geq 16 M_{\odot}$  respectivamente, possuem uma temperatura alta o bastante para ionizar gases mais pesados, tais como o oxigênio neutro. A ausência de emissões significantes de [OII] mostra que não existe uma forte presença de estrelas de tipo espectral "O" e "B", e que portanto não existe uma alta taxa de formação estelar nestes objetos. Deste modo, temos uma galáxia azulada, característica de objetos LTGs, devido a presença de estrelas "a", mas sem formação estelar, característica de objetos ETGs. Portanto temos um objeto que provavelmente está transitando entre um tipo morfológico e outro.

Como dito anteriormente, existe uma bimodalidade na distribuição de galáxias em relação a sua cor e formação estelar. As ETGs habitam o que é chamado de Sequência Vermelha e as LTGs habitando o chamado de Nuvem Azul. O *Green Valley* é a região que está entre essas duas regiões em um diagrama Massa vs Cor (Figura 1.4). As galáxias que habitam essa região entre os picos de concentração da nuvem azul e da sequência vermelha, região do GV, são predominantemente galáxias de disco com bojo predominante. No entanto, elas apresentam características peculiares, tais como aparência avermelhada, ausência de braços espirais bem definidos, e portanto não tendo uma aparência de LTG típicas nem de ETG típicas, mas sim uma categoria híbrida entre esses dois grupos morfológicos.

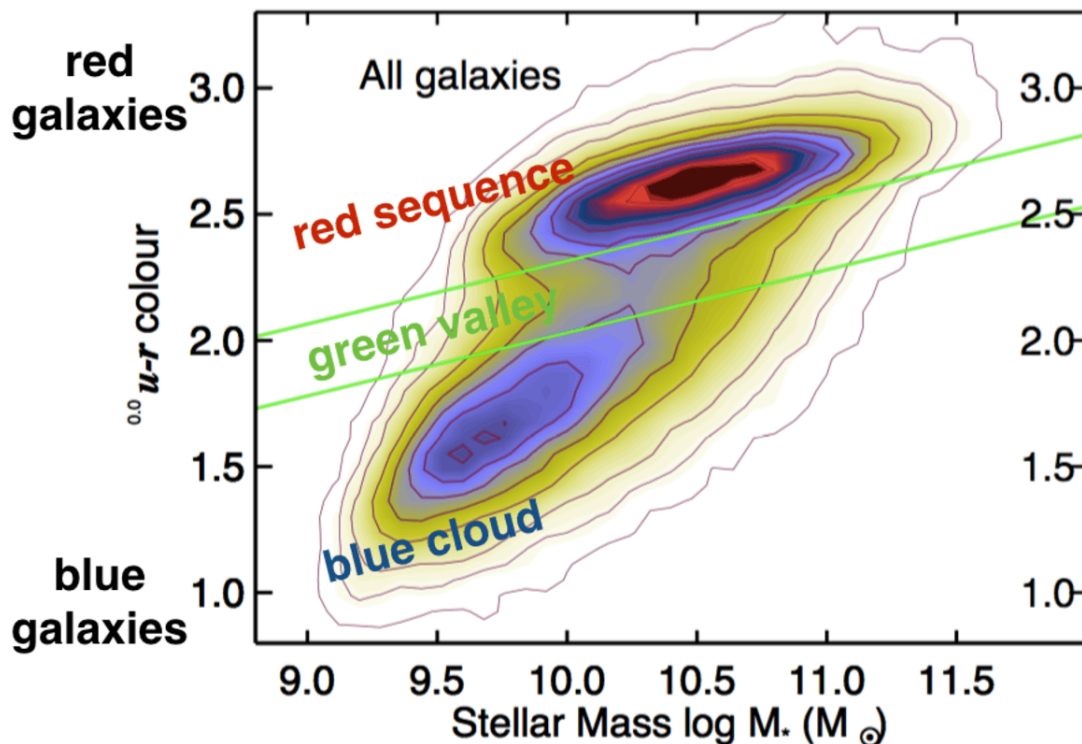


FIGURA 1.4. Imagem extraída de Schawinski et al. (2014). Na parte de baixo do gráfico temos a Nuvem Azul, habitada pelas LTGs. Na parte Superior temos a Sequência Vermelha, habitada por ETGs. Entre o pico de densidade desses dois grupos está o *Green Valley*, habitado por galáxias com aparência híbrida.

O grupo transitório de maior interesse para a nossa pesquisa são as MIEGs. As MIEGs são galáxias *Early-Type* que apresentam uma alta taxa de formação estelar apesar de serem morfológicamente classificadas como ETGs. Esse grupo foi apresentado



por Riguccini et al. (2015). Essas galáxias possuem um alta emissão de  $L_{24\mu m}/L_{2.2\mu m}$ , essa razão entre luminosidades no IR é um indicador da taxa de formação estelar por unidade de massa. Em  $2.2 \mu m$  é a faixa de maior emissão das estrelas de baixa massa (Cole et al., 2001), sendo assim representando a massa estelar da galáxia. Em  $24\mu m$  é a faixa de emissão de material circunestelar (Temi et al., 2007). Então, uma razão entre essas duas luminosidades indica quantas estrelas jovens se tem em função das estrelas velhas.

Essas galáxias em transição nos leva aos objetivos da nossa pesquisa, isso porque, os processos evolutivos das galáxias ainda não são inteiramente conhecidos, e portanto, estudar galáxias em transição pode nos levar a compreender quais são os processos que causam as mudanças físicas das galáxias, quais são os processos que levam ao fim da formação estelar, qual é o papel do ambiente nesses processos de mudança física e de cessação da formação estelar, entre outros questionamentos.

No entanto, é válido dizer que, a quantidade de tempo que uma galáxia passa pela fase transitória em comparação com o tempo que ela passa na Nuvem Azul e na Sequência Vermelha é muito curto, e portanto não é uma tarefa fácil detectar tais objetos uma vez que eles não vivem por muito tempo no estado transitório. Esse é o objetivo principal de nossa pesquisa atual, desenvolver um método robusto capaz de selecionar um grande número desses objetos.

## Capítulo 2

# Dados

A astronomia moderna vive a era dos levantamentos de dados. Por muitas décadas, talvez até séculos, as pesquisas eram feitas por indivíduos ou pequenos grupos que possuíam um telescópio, ou que eram membros de um instituição que possuía um, ou que conseguiam reservar tempo em um telescópio disponível para a comunidade científica. Esses dados eram coletados e analisados pelos próprios indivíduos e seus possíveis resultados publicados para seus pares avaliarem. Com a expansão do campo astronômico, a evolução da tecnologia e a necessidade de se enxergar cada vez mais para dentro das profundezas do universo, passou a ser necessário uma quantidade cada vez maior de dados e tempo de exposição. Isso fez com que as observações individuais ficassem cada vez mais custosas em tempo e dinheiro. Sem contar que, ao longo desses anos todos, se um indivíduo B precisasse de dados dos mesmos objetos astronômicos que o Indivíduo A observou, mas não o conhecesse e estivesse usando outro telescópio, ele faria as observações novamente e os mesmos objetos drenariam recursos duplamente.

Os levantamentos de dados trazem a solução para esse problema. Um grande consórcio é criado visando determinados interesses, fotometria/espectroscopia de estrelas/galáxias, detecção de exoplanetas, etc. Esses dados são então disponibilizados para a comunidade Internacional, permitindo que astrônomos e astrônomas do mundo todo utilizem esses dados para suas pesquisas. Existem muitos levantamentos como esses, e a tendência da ciência é utilizar levantamentos de dados e data science cada vez mais em seu dia a dia.

## 2.1 Origem

Em nossa pesquisa utilizamos um conjunto de 134 galáxias provenientes do aglomerado de Coma. Destas 134 galáxias, 32 delas foram classificadas como ETG e 102 delas foram classificadas como Não-ETG (os critérios de classificação serão elucidados no próximo capítulo).

Esses dados foram obtidos de uma combinação de dois bancos de dados. Parte deles foram coletados no 14º *data release* do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) e a outra parte no *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE). A escolha desses dois bancos de dados foram determinadas pelos parâmetros da pesquisa a ser desenvolvida. Para se atingir o objetivo da pesquisa (discutido na Introdução) é necessário que os dados possuam observações em bandas específicas para que possamos determinar a formação estelar dos objetos. Também é necessário que possuam certas informações fotométricas para que possamos fazer a classificação morfológica dos objetos. WISE e SDSS satisfazem essas condições, respectivamente.

### 2.1.1 SDSS

O *Sloan Digital Sky Survey* (York et al., 2000) é o mais completo levantamento fotométrico e espectroscópico do céu (Figura 2.1 e 2.2) Utiliza um telescópio de 2.5 m e atualmente esta na quarta fase do projeto e em execução desde o início dos anos 2000 já tendo obtido fotometria e espectroscopia de milhões de galáxias.

O SDSS é o fornecedor dos dados fotométricos utilizados para a classificação morfológica das nossas galáxias, são eles:

a fração do perfil de de Vaucouleurs calculado através do perfil de brilho da galáxia (veja mais detalhes na Subseção 3.2.1), e também os fluxos Petrosianos em diferentes raios, permitindo o cálculo da Concentração (veja mais detalhes na Subseção 3.2.2).

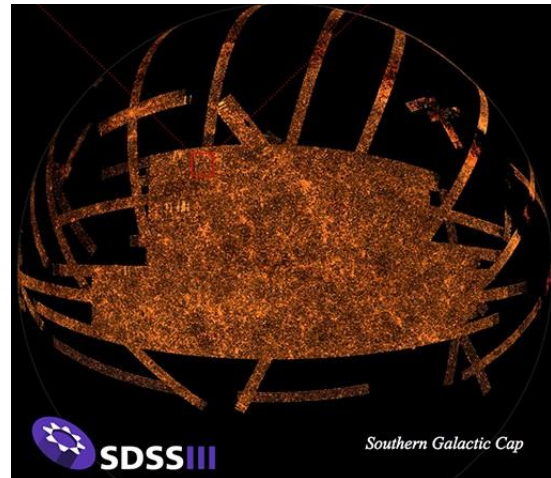


FIGURA 2.1. Imagem representando toda a área coberta por observações do SDSS no Hemisfério Sul Galáctico. Junto com a Figura 2.2 mostra a riqueza das observações e a capacidade de cobrir grande parte do céu.

Além disso a seleção das fontes pertencentes ao aglomerado de Coma, nosso aglomerado de teste, é realizada com dados do SDSS (veja mais detalhes na Subseção 3.1). Essa seleção fornece uma amostra de 913 galáxias, que posteriormente terão suas luminosidades obtidas no WISE. Muitas dessas galáxias são perdidas devido a falta de detecção no WISE ou por não cumprirem critérios de seleção na nossa amostra.

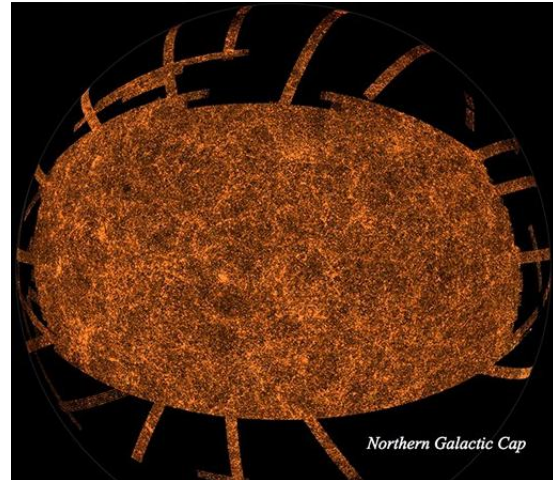


FIGURA 2.2. Imagem representando toda a área coberta por observações do SDSS no Hemisfério Norte Galáctico. Junto com a Figura 2.1 mostra a riqueza das observações e a capacidade de cobrir grande parte do céu.

### 2.1.2 WISE

O *Wide-field Infrared Survey Explorer* é uma missão de exploração da NASA lançada em dezembro de 2009 com o objetivo de imagear o céu inteiro no infra vermelho, e assim catalogar objetos com fortes emissões nessa faixa do espectro eletromagnético, tais como asteroides e planetas no sistema solar, estrelas e galáxias. Seu objetivo foi atingido em 2011 e o telescópio foi descomissionado. Em 2013 foi reativado, agora com um novo nome, NEOWISE e com o objetivo único de observar, catalogar e estudar os NEOs (acrônimo inglês para Objetos Próximos da Terra), que são corpos celestes (cometas, asteroides, e meteoroides) cuja órbita intersepta com a órbita da Terra, proporcionando risco de colisão entre estes corpos celeste e nosso planeta.

O WISE realizou seu imageamento do céu em quatro bandas de observação: W1 em  $3.4 \mu m$ , W2 em  $4.6 \mu m$ , W3 em  $12 \mu m$  e por fim W4 em  $22 \mu m$ . Como foi discutido no fim da Seção 1.3 essas bandas são importantes no âmbito extragalático porque carregam consigo informações sobre a massa estelar da galáxia (W1) e da formação estelar das galáxias (W4). Em adição a isso, e talvez o fato mais importante para que escolhêssemos utilizar o WISE é sua cobertura de todo o céu, tanto no Hemisfério Norte Galáctico como no Hemisfério Sul Galáctico. Isso traz vantagens significativas sobre outros telescópios porque nos permite realizar o estudo de múltiplos ambientes e ao mesmo tempo não ser

necessário utilizar múltiplos instrumentos. Isso leva a uma consistência e uma capacidade de comparar resultados de modo muito simples, sem trazer os vieses de seleção de outros instrumentos.

O banco de dados do WISE fornece apenas as magnitudes das galáxias, de modo que as luminosidades destas magnitudes precisaram ser calculadas. Felizmente tais cálculos já existem em literatura e foram realizados e disponibilizados por Chang et al. (2015), para galáxias com contrapartida no levantamento espectrocópico do SDSS.

Acreditamos ser importante chamarmos a atenção para o fato da nossa amostra final para o aglomerado de Coma ser tão pequena em relação ao que tínhamos selecionado como membros do aglomerado de Coma pelo SDSS. Isso deve ao fato de ao correlacionarmos os dados do SDSS com os dados disponíveis por Chang et al. (2015) temos uma perda significativa de dados devido a imposição que colocamos na qualidade do sinal ruído (SN) dos dados na banda W4, exigindo que eles tenham  $SN > 2$ . Essa imposição foi feita para garantir a qualidade da fotometria do WISE e portanto evitar superestimar ou subestimar a formação estelar presente nas galáxias.

## Capítulo 3

# Metodologia

Riguccini et al. (2015) apresentou o conceito de MIEGs (Mid-IR Enhanced Galaxies), que são galáxias Early-Type que apresentam altas taxas de formação estelar em comparação com seu grupo morfológico. Foram selecionadas 10 MIEGs no aglomerado de Coma e 3 no aglomerado de Virgo. As MIEGs são um grupo de objetos interessantes a serem estudados porque violam o conhecimento pré estabelecido sobre o grupo ETG, e é bem provável que essa peculiaridade em sua taxa de formação estelar esteja relacionada com os processos evolutivos dessas galáxias. Com isso em mente, nossa pesquisa estabelece um método confiável de detecção dessas galáxias para que possamos produzir um catálogo desses objetos em diferentes aglomerados e estudar quais são os processos responsáveis por essa formação estelar elevada, e também para determinar qual é o papel que o ambiente em que estas galáxias estão inseridas tem nessa formação estelar.

Baseando-nos no método apresentado por Riguccini et al. (2015), nós utilizamos uma razão entre  $L_{22\mu m}$  e  $L_{3.4\mu m}$  para estimar a taxa de formação estelar dos objetos, isso porque é esperado que exista uma relação entre a razão de luminosidades nestas faixas de comprimento de onda e a taxa de formação estelar da galáxia (para mais detalhes veja a Seção 3.4). Como existem diferenças nas bandas utilizadas (Riguccini e colaboradores utiliza  $L_{24\mu m}$ , proveniente do telescópio Spitzer, e  $L_{2.2\mu m}$ , proveniente do telescópio 2MASS) se faz necessário testar a eficácia da nossa metodologia, e para isso aplicamos nosso método no aglomerado de Coma. Coma é um rico e conhecido aglomerado de galáxia que se encontra na constelação Coma Berenices no hemisfério norte. Ele já foi alvo de muitos estudos, portanto seu ambiente é relativamente bem

conhecido, possui uma população de mais de mil galáxias, e portanto, fornece um bom número de objetos para estudo. Com este teste no aglomerado de Coma, esperamos estabelecer que nossa metodologia é robusta o bastante não somente para recuperar os resultados já estabelecidos por Riguccini et al. (2015), mas também para apresentar novos objetos em transição.

Nossa método possui 4 passos: 1º Seleção de Fontes: onde determinamos quais são as galáxias membros do aglomerado de Coma e quais possuem dados no WISE; 2º Determinação Morfológica: onde classificamos morfológicamente nossas galáxias como ETG ou Não-ETG; 3º Inspeção Visual das Galáxias: onde fazemos uma seleção aleatória de fontes classificadas como ETG e Não-ETG para determinar a confiabilidade da classificação; 4º Análise da relação entre  $\text{Log}(L_{22}/L_{3.4})$  e  $\text{Log}(L_{3.4})$ .

### 3.1 Seleção de Fontes

Com nosso alvo de estudo definido, nos deparamos com a primeira tarefa de nosso estudo: selecionar as galáxias pertencentes ao aglomerado de Coma. Essa seleção foi feita utilizando um método chamado *Shifting Gapper* (Fadda et al., 1996; Lopes et al., 2009).

O *Shifting Gapper* é uma técnica que determina quais são os objetos que são membros de um aglomerado e quais objetos apenas aparentam ser parte do aglomerado devido a efeitos de projeção na linha de visada. O grande diferencial desta técnica para outras que realizam a mesma função é que para determinar quais galáxias pertencem ao aglomerado não é necessário assumir nenhuma hipótese em relação a dinâmica das galáxias do aglomerado, e nem se é um aglomerado relaxado ou não.

A técnica funciona através da aplicação de *bins* radiais do centro do aglomerado, cada *bin* com tamanho de  $0.42 h^{-1} \text{ Mpc}$ . O primeiro passo a ser tomado é selecionar todas as galáxias presentes numa região de  $2.5 h^{-1} \text{ Mpc}$  ( $3.57 \text{ Mpc}$  para  $h = 0.7$ ), mantendo apenas aquelas com  $|v_{objeto} - v_{aglomerado}| \leq 4000 \text{ km s}^{-1}$ , onde  $v = cz$  é a velocidade ao longo da linha de visada. Esse valor de raio é apropriado porque em quase todos os casos é maior do que o raio de virial do aglomerado, e essa diferença de velocidade é apropriada porque galáxias com diferença velocidade maior que  $4000 \text{ km s}^{-1}$  não pertencem ao aglomerado.

O segundo passo é definir a equação para a diferença de velocidades máxima ( $v_{dif}$ ) para as fonte serem consideradas como membros desse primeiro *bin*, que é dado pelo maior valor entre:

- $|v_{min} - v_{aglomerado}|$
- $|v_{max} - v_{aglomerado}|$

Tendo definido o valor de  $v_{dif}$ , temos que:

- $v_{min} = v_{aglomerado} - v_{dif}$
- $v_{max} = v_{aglomerado} + v_{dif}$

Por fim, aplicamos essas equações para o primeiro *bin* radial, de valor  $0.42 h^{-1} Mpc$  do centro do aglomerado (para esse primeiro caso, se em um raio de  $0.42 h^{-1} Mpc$  não houver pelo menos 15 galáxias, então ele deve ser expandido até que haja), e definimos os valores de  $v_{min}$  e  $v_{max}$  para essa região. Se  $v_{dif}$  desse primeiro grupo for  $\leq c[0.001(1 + z_{aglomerado})]$ , então esse grupo é considerado como válido e as galáxias com velocidade dentro o intervalo  $v_{min} \leq v \leq v_{max}$  são consideradas como membros do aglomerado. O processo se repete para os próximos *bins* até não se ter mais novas galáxias dentro do intervalo  $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ . Usando está técnica, determinamos que o aglomerado de Coma possui 913 galáxias, mas como explicamos no Capítulo 2, muitas destas fontes não possuíam dados confiáveis no WISE, ou até mesmo não foram observadas pelo mesmo. Isso nos deixou com uma amostra final com um total de 134 galáxias no aglomerado de Coma.

## 3.2 Determinação Morfológica

Um aspecto muito, se não o mais, importante da nossa pesquisa é a classificação morfológica dos objetos. Portanto é de suma importância que os classifiquemos de forma confiável. Com isso em mente, decidimos usar uma filtragem dupla baseadas em características do comportamento da luz nos objetos Early-Type.

Antes de definirmos os parâmetros de classificação morfológica, é importante que fique claro que os objetos de estudo desta pesquisa são as ETGs, e portanto nossa não



aplicamos um método de definição morfológica rigoroso para selecionar LTG como o que foi aplicado para as ETG. Em consequência disso não nos arriscando a utilizar a nomenclatura LTG para os objetos que não se enquadram no grupo ETG.

Como já foi estipulado em literatura, galáxias elípticas, que são as principais galáxias do grupo Early–Type, possuem um perfil de brilho de luz com uma dependência de  $r^{1/4}$  (de Vaucouleurs, 1948). Ou seja, o brilho varia de forma abrupta com a distância. Já galáxias espirais, que compõem o grupo Late–Type, possuem uma variação de brilho com dependência exponencial  $e^{-r}$  (Patterson, 1940; de Vaucouleurs, 1959; Freeman, 1970). Ou seja, o brilho superficial decai de maneira suave ao longo da superfície galáctica. Esse comportamento da luz de acordo com a morfologia da galáxia nos permite utilizar dois parâmetros fotométricos para seleção de ETGs: fracDeV e Concentração.

### 3.2.1 FracDeV

Como dito anteriormente, ETGs possuem um brilho superficial com dependência de  $r^{1/4}$ . Mais precisamente:

$$\lg\left(\frac{I(r)}{I_e}\right) = -3.33071 \left[ \left(\frac{r}{r_e}\right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right] \quad (3.1)$$

ou, como é comumente representada em gráficos:

$$\mu(r) = \mu_e + 8.32678 \left[ \left(\frac{r}{r_e}\right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right] \quad (3.2)$$

onde,

- $I_e$  é o brilho superficial efetivo da galáxia;
- $\mu_e$  é a densidade de brilho superficial efetivo da galáxia;
- $r_e$  é o raio efetivo da galáxia;
- $\mu(r)$  tem como unidade  $mag/arcsec^2$ .

já para LTGs, o brilho superficial tem dependência de  $e^{-r}$ , mais precisamente:

$$I(r) = I_0 e^{-r/h} \quad (3.3)$$

ou, novamente, como é mais comumente representada:

$$\mu(r) = \mu_0 + 1.0857 \frac{r}{h} \quad (3.4)$$

- $I_0$  é o brilho superficial central da galáxia;
- $\mu_0$  é a densidade do brilho superficial central da galáxia.

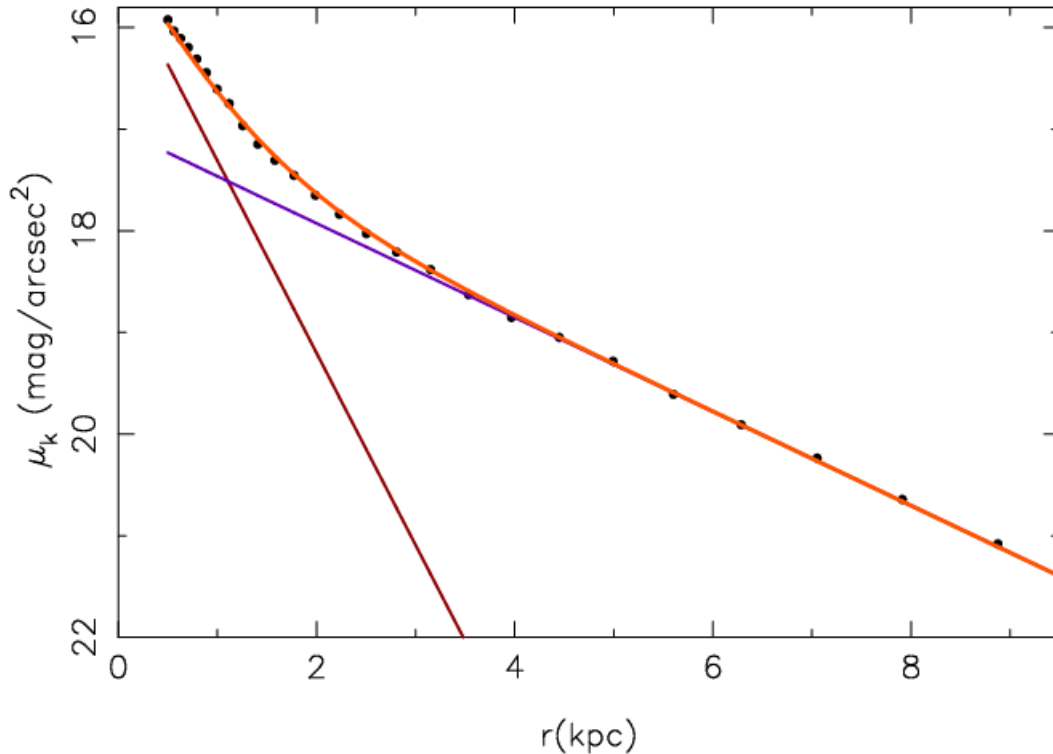


FIGURA 3.1. Representação dos dois perfis ideais possíveis, o perfil que segue a lei de de Vaucouleurs (em marrom), para galáxias ETGs, Equação 3.2, e o perfil que segue a lei exponencial (em azul), para galáxias LTGs, Equação 3.4. E tem-se, também, o perfil de uma galáxia qualquer (em laranja), que segue uma combinação dos dois perfis idealizado. imagem retirada de: <http://inspirehep.net/record/821528/plots>

O fracDeV é um parâmetro fotométrico (ou seja, obtido apenas através de observações fotométricas, sem necessidade de espectroscopia) que tem como função definir o tipo de perfil de brilho que a galáxia segue (vide Figura 3.1). A variação vai de um perfil puramente de de Vaucouleurs (fracDeV = 1) à um perfil puramente exponencial (fracDeV = 0). Por literatura (Bernardi et al., 2005) podemos dizer que caso fracDeV  $\geq 0.8$ , ou seja, se 80% do perfil de de brilho da galáxia condiz com a lei de de Vaucouleurs, então temos uma ETG. Se a fração for menor que 80%, então esse objeto não é uma ETG.

Em nosso trabalho não é suficiente que a galáxias possua  $\text{fracDeV} \geq 0.8$  para ser classificada como ETG em nossa amostra. Isso porque, queremos diminuir ao máximo possível contaminações na classificação morfológica de nossas galáxias, e para tanto, usamos, como dito anteriormente, uma filtragem dupla. Desse modo, galáxias com  $\text{fracDeV} \geq 0.8$  são colocadas para o teste de concentração.

### 3.2.2 Concentração

A Concentração é uma outra maneira de se determinar a variação do brilho superficial de uma galáxia. O parâmetro de concentração é uma medida de quão concentrado o brilho superficial de uma galáxia é em sua região central. De acordo com as Equações 3.2, ETGs possuem uma densidade de brilho superficial maior na região central, e quanto mais nos afastamos da região central, em direção às bordas da galáxias, menor é a densidade de brilho superficial. Já em LTGs, a presença dos braços espirais diminui a concentração da densidade de brilho nas regiões centrais e o difunde ao longo da galáxia. Desse modo podemos caracterizar morfologia usando essa característica.

A concentração ( $C$ ) é medida usando-se o fluxo Petrosiano da galáxia. O fluxo Petrosiano é definido como o fluxo observado dentro de um raio de  $2r_e$ , sendo  $r_e$  o raio efetivo, que é o raio em que metade da luz total da galáxia é emitido. Portanto, para determinar a concentração da galáxia toma-se a razão entre o raio que contém 90% do fluxo Petrosiano e o raio que contém 50% do fluxo Petrosiano da galáxia.

Da literatura (Strateva et al., 2001; Shimasaku et al., 2001) temos que uma separação morfológica entre ETG e LTG usando  $C \geq 2.6$  possui uma contaminação esperada de  $\sim 15 - 20\%$ . Dito isso, fizemos uma seleção dos objetos que possuem  $\text{fracDeV} \geq 0.8$  e  $C \geq 2.6$  como objetos ETGs e aqueles que não se enquadram nesses intervalos, mesmo que seja em apenas uma dessas características, será classificada como Não-ETG. Com isso esperamos que nossa amostra tenha uma contaminação menor do que a apresentada quando as galáxias são classificadas usando apenas um dos dois parâmetros.

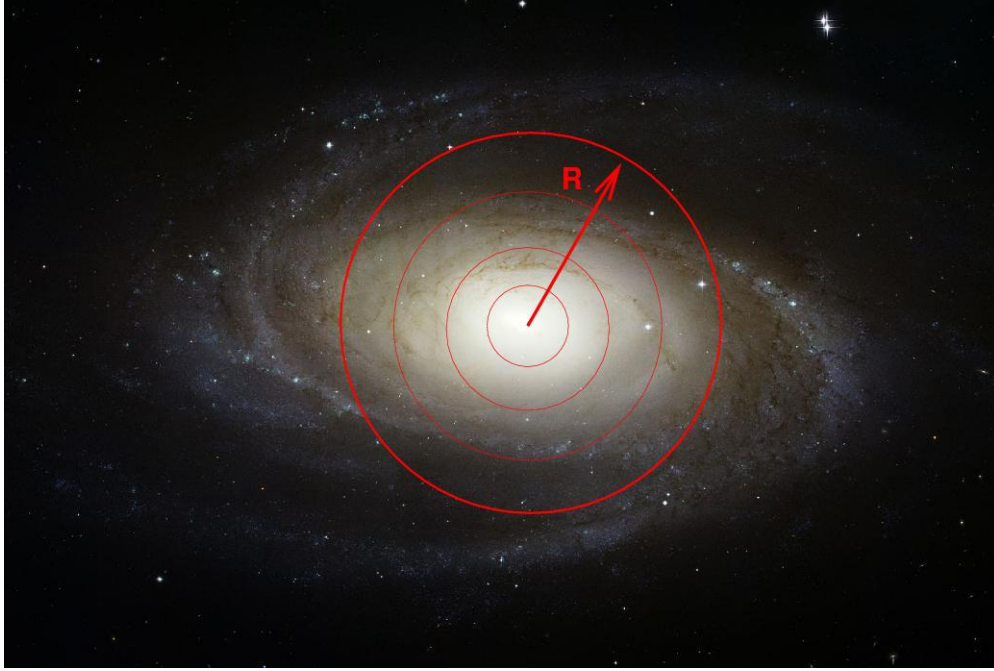


FIGURA 3.2. Representação dos raios que delimitam as diferentes porcentagens do fluxo Petrosianos. Em nosso caso, estamos interessados nos raios que contem 90% e 50% do fluxo. Imagem retirada de: [http://spiff.rit.edu/classes/phys443/lectures/gal\\_1/petro/petro.html](http://spiff.rit.edu/classes/phys443/lectures/gal_1/petro/petro.html)

### 3.3 Análise por Massa

Como dito anteriormente neste capítulo, a classificação morfológica das nossas galáxias é um ponto muito importante da nossa pesquisa. Para termos certeza de que nossa classificação é confiável, executamos um teste visual nas galáxias.

A análise foi feita tomando cada um dos grupos morfológicos e os separando em uma série de *bins* de massa estelar, 6 *bins* para as ETGs e 7 *bins* para as Não-ETGs. Selecionamos, aleatoriamente, 5 galáxias de cada um dos *bins*, e obtivemos do SDSS suas imagens ( Não-ETGs: Figura 3.3, ETGs: Figura 3.4).

As galáxias ETGs possuem uma massa variando entre  $10^{8.64} M_{\odot} \leq M_{estelar} \leq 10^{11.4} M_{\odot}$ , com *bins* indo de  $10^{8.5} M_{\odot}$  até  $10^{11.5} M_{\odot}$  com a potência variando em um intervalo de 0.5. Galáxias Não-ETGs possuem uma massa variando entre  $10^{7.9} M_{\odot} \leq M_{estelar} \leq 10^{11.5} M_{\odot}$  com *bins* indo de  $10^8 M_{\odot}$  até  $10^{11.5} M_{\odot}$  com a potência variando em um intervalo de 0.5.

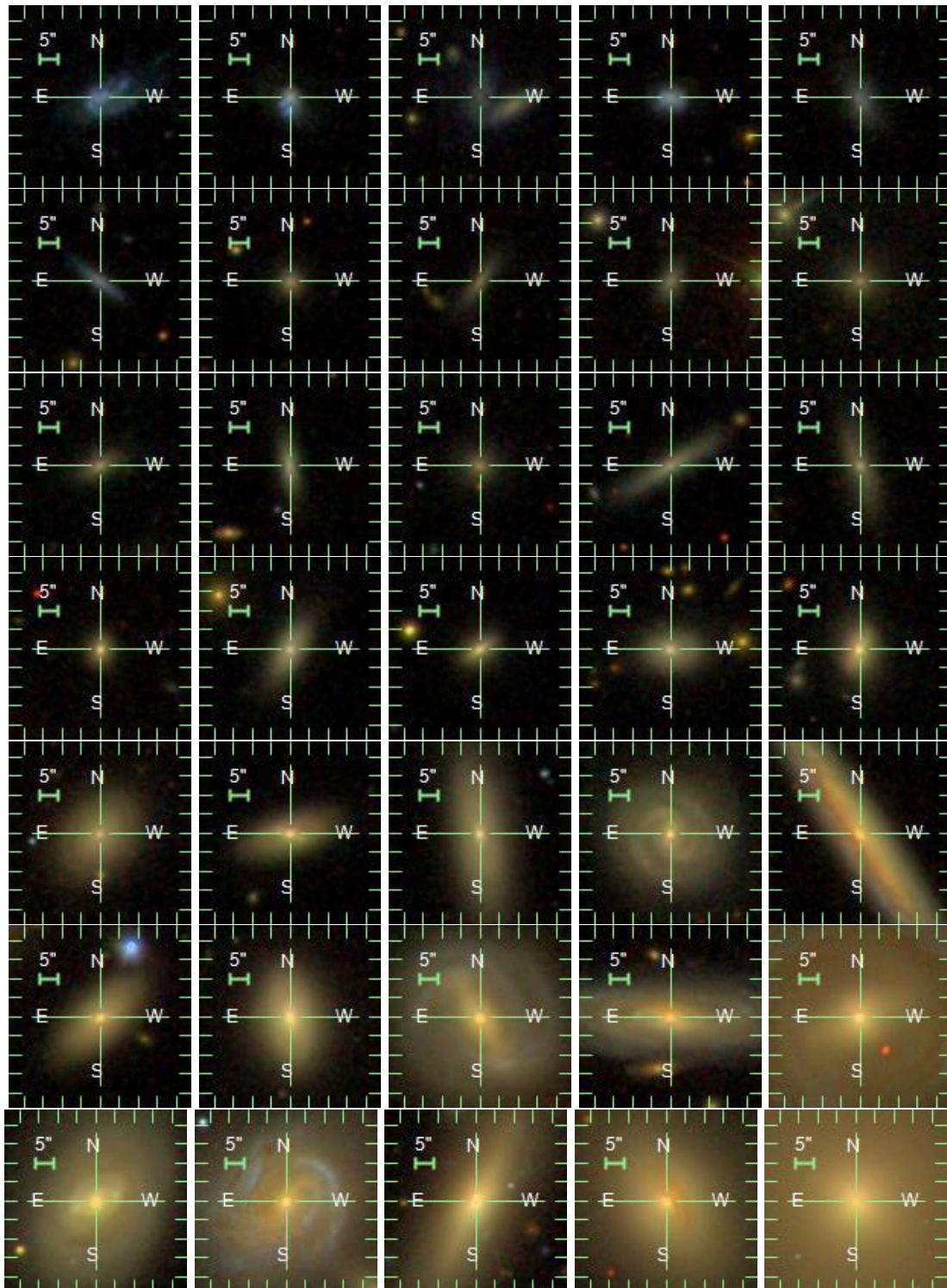


FIGURA 3.3. Imagens da seleção aleatória feita para as Não-ETGs. Cada linha representa um *bin*. A primeira linha é o *bin* 1, a segunda linha é o *bin* 2, etc. Apesar de nossa seleção não se preocupar em definir galáxias LTG, pode-se notar que, de maneira geral, as galáxias rejeitadas pelo critério de seleção ( $\text{fracDeV} \geq 0.8$  e  $\text{conc} \geq 2.6$  são objetos espirais).

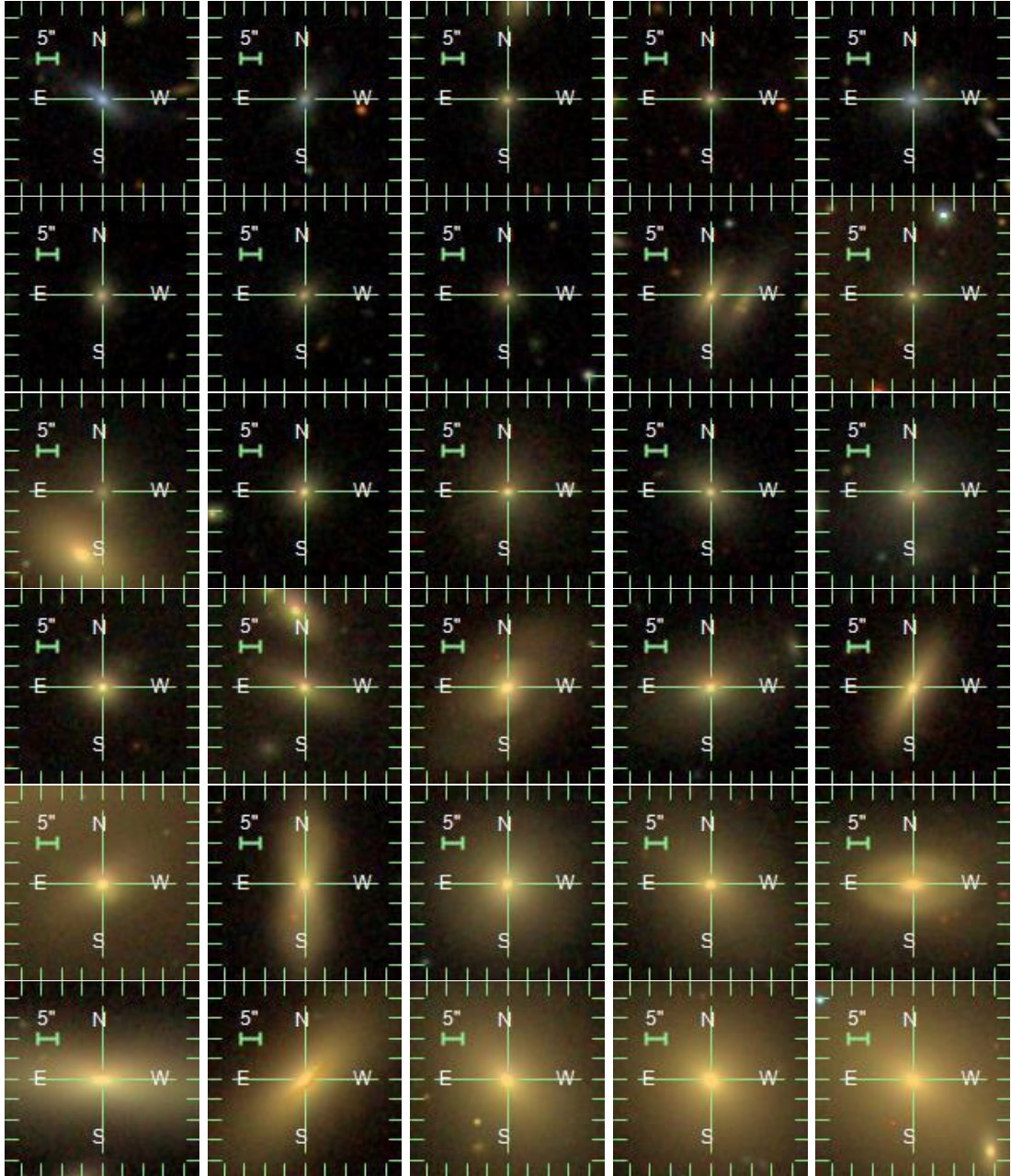


FIGURA 3.4. Imagem da seleção aleatória feita para as ETGs. Cada linha representa um *bin*. A primeira linha é o *bin* 1, a segunda linha é o *bin* 2, etc. É fácil notar que as galáxias nas três primeiras linhas,  $10^8 M_{\odot} \leq M_{\text{tot}} \leq 10^{10} M_{\odot}$ , são objetos pequenos, e portanto difíceis de se tirar conclusões visualmente. Pode-se notar que a terceira galáxia da quarta linha possui o que parecem ser braços espirais, mas a qualidade da imagem não é muito boa para uma certeza na afirmação.

Em regimes de baixa massa, tem-se uma dificuldade na classificação morfológica dos objetos. Isso ocorre porque visualmente é muito difícil determinar as características físicas dos objetos de baixa massa. Isso pode ser observado na Figura 3.4. Nos três primeiros *bins*,  $M_{\text{estelar}} \leq 10^{10} M_{\odot}$ , é difícil identificar visualmente a presença de características morfológicas, tais como presença ou ausência de braços espirais. Não obstante, todas as galáxias apresentadas na Figura 3.4 possuem parâmetros fotométricos baseados

no comportamento da luz, como foi explicado em seções anteriores, que as classificam como ETGs. Diante disso, decidimos mantê-las em nossa amostra com a adição de um marcador que as identifiquem como objetos de difícil confirmação visual de sua classificação morfológica.

### 3.4 Relação entre $L_{22 \mu m}$ e $L_{3.4 \mu m}$

Utilizar o telescópio WISE tem vantagens pela sua capacidade de seleção de fontes ao longo do céu todo, permitindo que selecionemos vários aglomerados para estudar como a formação estelar das MIEGs varia com o meio ambiente. No entanto, esse não é o único motivo que nos levou a utilizar o telescópio WISE. O comprimento de onda em duas de suas bandas,  $22 \mu m$  e  $3.4 \mu m$ , são comprimentos propícios para estimar a taxa de formação estelar sem ser necessário utilizar um ajuste de densidade de energia espectral (SED, em inglês) da galáxia, o que requer uma grande quantidade de observações em diversas bandas.

Essa vantagem em não precisar de observações em múltiplas bandas faz com que os recursos necessários para se detectar ETGs em transição usando as bandas W4 ( $22 \mu m$ ) e W1 ( $3.4 \mu m$ ) seja mais barato, em termos de tempo de observação e recursos dispensados, do que detectar ETGs em transição usando a Taxa de Formação Estelar (SFR, em inglês) obtidas através do ajuste da SED da galáxias.

Estrelas se formam através do colapso gravitacional de nuvens de gás e poeira frias. Essa matéria condensa na região central até que a protoestrela tenha pressão e temperatura alta o bastante para que o núcleo da protoestrela comece a converter átomos de Hidrogênio em átomos de He, liberando energia no processo, e passe a ser chamada de estrela. No início da vida da estrela, essa nuvem de poeira e gás ainda está presente ao redor da estrela. Essas estrelas jovens emitem fótons altamente energéticos, que por sua vez são absorvidos pela matéria ao redor da estrela. Esses fótons absorvidos são posteriormente reemitidos e como mostrado em Davis et al. (2014), essa emissão acontece na faixa de  $20 - 25 \mu m$ . Portanto, a banda W4 ( $22 \mu m$ ) do WISE é um ótimo indicador de formação estelar.

Em adição, de Norris et al. (2014) temos que  $3.4 \mu m$  é um excelente indicador de massa das estrelas velhas da galáxia. Existe uma forte emissão de Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAH, em inglês) em  $3.3 \mu m$ . PAH são uma família de compostos que possuem dois, ou mais, anéis aromáticos (Figura 3.5). Também são umas das moléculas mais abundantes do universo local. Norris e seus colaboradores afirmam que em estrelas velhas, que é o tipo de estrelas que estamos interessados, o efeito dessas emissões é negligenciável. Por ser um bom indicador de massa de estrelas antigas, a banda W1 ( $3.4 \mu m$ ) do WISE é um bom in-

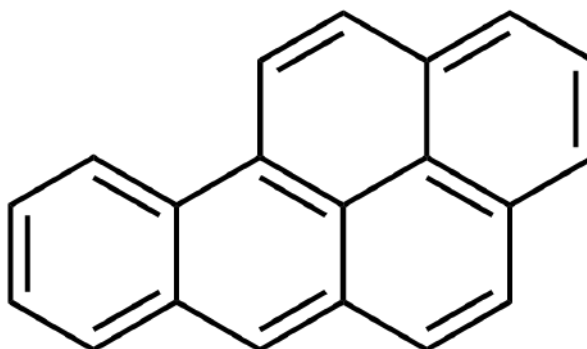


FIGURA 3.5. Benzeno(a)pireno é um exemplo de PAH. O Benzeno(a)pireno é um mutagênico cancerígeno que pode ser encontrado em gases de exaustão. PAH são uma classe de moléculas orgânicas que podem ser encontrados em muitas formas e em diversas condições, tanto na Terra quando fora dela.

dicador da massa estelar da galáxia, já que como é de nosso conhecimento, a grande maioria das estrelas de uma galáxia são estrelas velhas, frias e de baixa massa.

Dessa forma, temos que a banda W4 ( $22 \mu m$ ) é um bom indicador da formação estelar na galáxia e a banda W1 ( $3.4 \mu m$ ) é um bom indicador da massa estelar da galáxia, portanto a razão entre essas duas luminosidades é um bom indicador da taxa de formação estelar específica dessa galáxia. Fazendo-se um gráfico dessas propriedades, Figura 3.6, podemos analisar qual é a formação estelar por unidade de massa desses objetos, e comparar as possíveis ETGs que apresentem uma taxa de formação estelar muito diferente das demais ETGs.

Em um primeiro momento, a separação entre ETGs com alta taxa de formação estelar, candidatas a MIEGs, e ETGs regulares foi feita visualmente. É fácil notar ao se analisar a Figura 3.6, que existe uma clara separação entre a população principal das ETGs, aquelas com  $\text{Log}(L_{22}) < 32.8$ , das ETGs que possuem  $\text{Log}(L_{22}) > 32.8$ . A presença na parte inferior do gráfico indica uma baixa taxa de formação estelar, enquanto que a presença na parte superior do gráfico indica uma alta taxa de formação estelar.

Apesar da separação ser visualmente clara neste caso, nada nos garante que em



outros aglomerados a separação será tão evidente a ponto de podermos selecionar MIEGs visualmente. Portanto, é necessário que tenhamos um modo mais confiável e que não dependa de qual aglomerado estamos trabalhando.

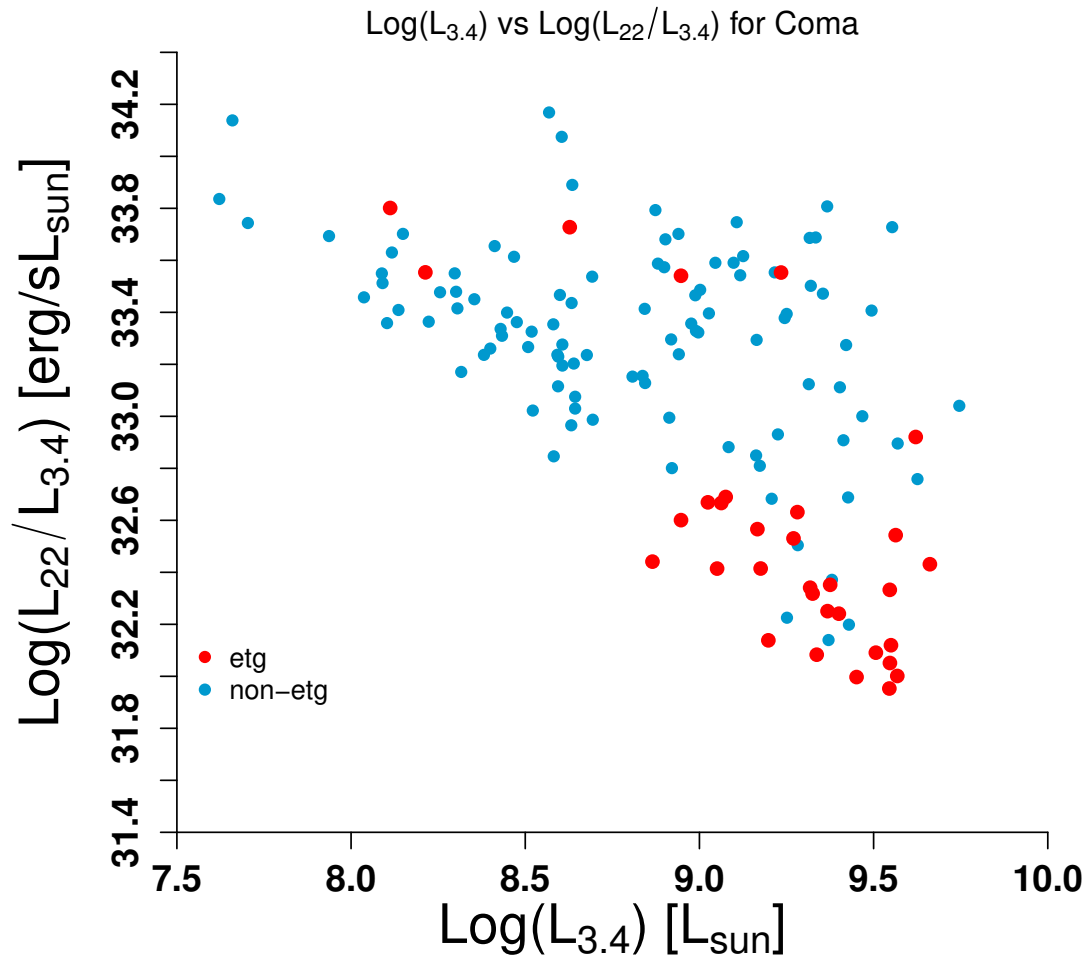


FIGURA 3.6. Relação entre  $L_{22\mu m}/L_{3.4\mu m}$  indicando a taxa de formação estelar em função da massa estelar ( $L_{3.4\mu m}$ ) para o aglomerado de Coma. Pontos vermelhos são ETG e os azuis são Não-ETG.

### 3.5 Separação Por Gaussianas

No contexto do que foi discutido no fim da seção anterior, se faz necessário desenvolver um modo de selecionar MIEGs de forma mais confiável e que independa do ambiente em que estamos trabalhando. Para isso fizemos a distribuição de  $\text{Log}(L_{22}/L_{3.4})$  e ajustamos uma gaussiana para cada uma das duas distribuições (Figura 3.7). Espera-se

que ETGs estejam dentro de uma distribuição e que Não-ETGs estejam dentro de outra distribuição, isso porque cada um desses grupos possuem diferentes características físicas que as distinguem em dois grupos. Portanto, qualquer ETG que esteja dentro da distribuição das Não-ETGs deve possuir características físicas que são mais similares com galáxias Não-ETGs do que com seu próprio grupo morfológico. Desse modo, esses objetos devem ser galáxias ETG em processo de transição, e como consequência lhes demos o rótulo de MIEGs.

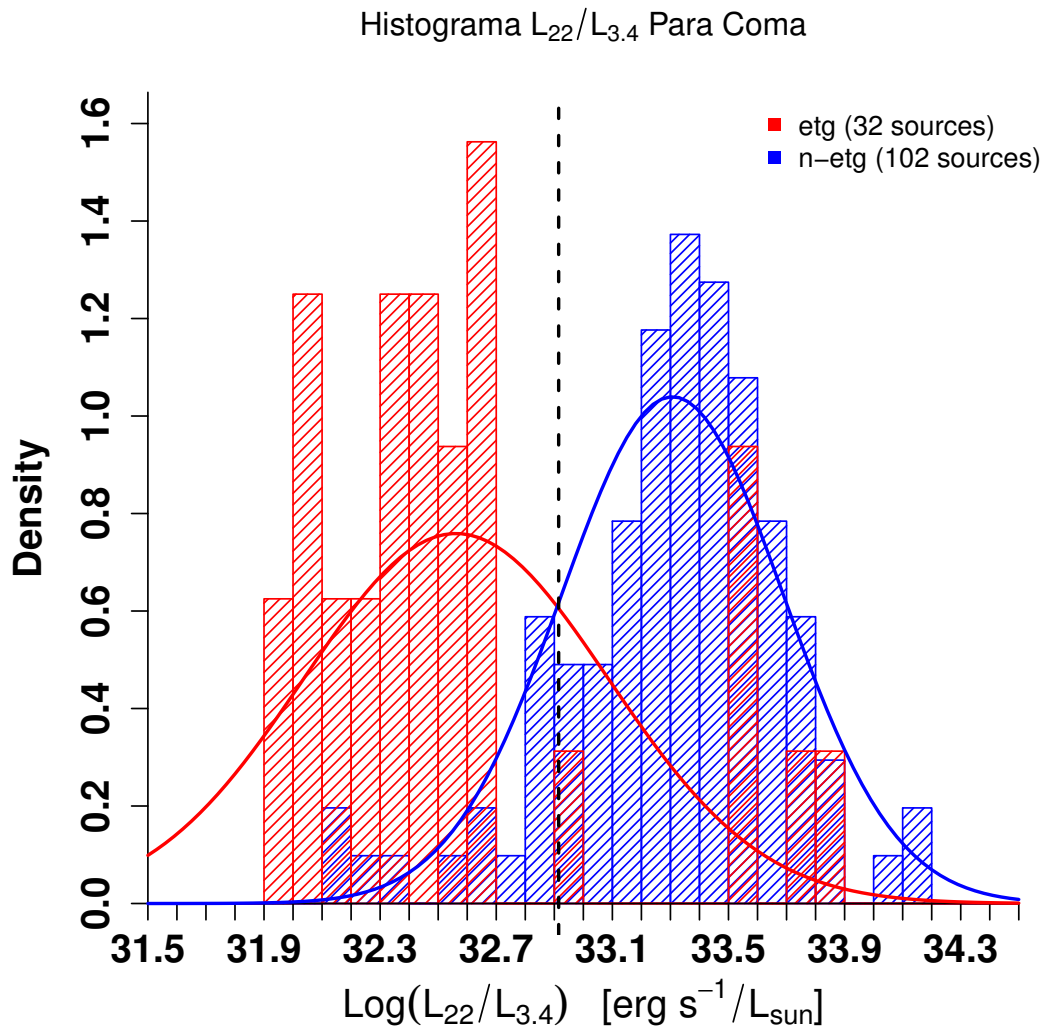


FIGURA 3.7. Distribuição de  $\text{Log}(L_{22\mu\text{m}}/L_{3.4\mu\text{m}})$  para as 134 galáxias presentes em nossa amostra. Em azul temos as Não-ETGs, com 102 galáxias e em vermelho temos as ETGs, com 32 galáxias. Em tracejado temos o ponto em que as duas gaussianas se interceptam, em  $\text{Log}(L_{22\mu\text{m}}/L_{3.4\mu\text{m}}) = 32.915$ . Desse modo, a linha tracejada separa MIEGs de ETGs regulares (ou objetos com alta taxa de formação estelar de galáxias passivas).

## Capítulo 4

# Resultados

Desenvolvemos um método para selecionar galáxias *Early-Type* que apresentem alta taxa de formação estelar. Ele foi aplicado para uma amostra contendo 134 galáxias pertencentes ao aglomerado de Coma. Dessas 134 galáxias, 102 não se enquadraram com os critérios morfológicos, explicados na Seção 3.2, para receberem o rótulo de ETG. As demais 32 galáxias destas 134, cumpriram as condições da Seção 3.2 e portanto são galáxias ETG de acordo com nossos critérios de classificação. Nosso método foi capaz de selecionar como MIEGs, 7 das 10 galáxias classificadas como MIEGs por Riguccini et al. (2015) presentes no aglomerado de Coma, rejeitou uma, e as outras 2 não estão presentes na nossa amostra. Esse já seria, por si só, um resultado encorajador, pois mostra que nosso método de seleção é capaz de detectar MIEGs. No entanto, fomos além e selecionamos 6 novas galáxias que se enquadram morfológicamente como ETG, e que apresentam uma taxa de formação estelar maior que as demais ETGs presentes no aglomerado (Figura 4.1).

É importante chamar a atenção para o fato de que, em nossa amostra, as MIEGs de Riguccini et al. (2015) não são classificadas como ETGs de acordo com nosso critério de seleção. No entanto, não entendemos isso como uma desvantagem da metodologia ou como uma desvalidação dos resultados encontrados por Riguccini e colaboradores, mas sim como uma confirmação de que tais objetos possuem características peculiares e são de fato objetos em transição morfológica. Ademais, é fácil notar ao se comparar as imagens (Figura 4.2) e espectros (Figura 4.3) das MIEGs obtidas por nossa metodologia com as imagens (Figura 4.4) e espectros (Figura 4.5) das MIEGs de Riguccini et al.

(2015), que apesar de classificarmos esses objetos de forma diferente eles são muito similares, o que reforça nossa confiança nos resultados obtidos em nossa pesquisa.

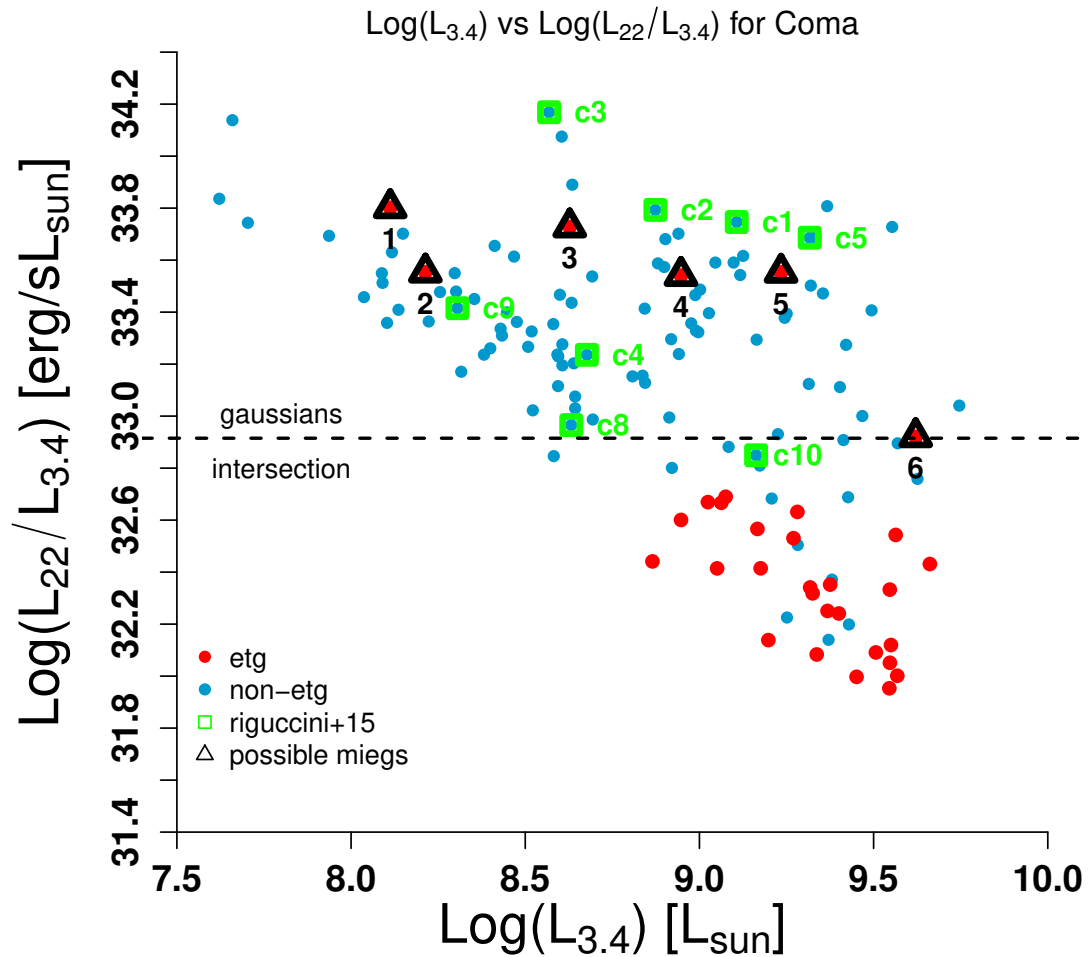


FIGURA 4.1. Relação entre  $L_{22\mu m}/L_{3.4\mu m}$  indicando a taxa de formação estelar em função da massa estelar ( $L_{3.4\mu m}$ ) para o aglomerado de Coma. Pontos azuis são galáxias que não se enquadram na classificação morfológica do grupo ETG e portanto recebem a nomenclatura de Não-ETG. Pontos vermelhos são galáxias ETG. Triângulos pretos são galáxias ETGs classificadas como MIEGs no presente trabalho. Quadrados verdes são as MIEGs de Riguccini et al. (2015) presentes em nossa amostra. A linha tracejada é a linha em que as gaussianas que representam as duas populações se interceptam (ver Figura 3.7).

Algumas considerações são importantes em relação as MIEGs apresentadas na Figura 4.1. Das 6 MIEGs que obtivemos como resultado, apenas duas, MIEGs 5 e 6, apresentam massa superior a  $10^{10} M_{\odot}$ . Como foi discutido na Seção 3.3, objetos com massa inferior a  $10^{10} M_{\odot}$  são objetos de classificação morfológica mais incerta por serem objetos pequenos e de difícil confirmação visual dos aspectos físicos, tais como presença

ou não de braços espirais. Para mais detalhes sobre as propriedades confira a Tabela 4.1.

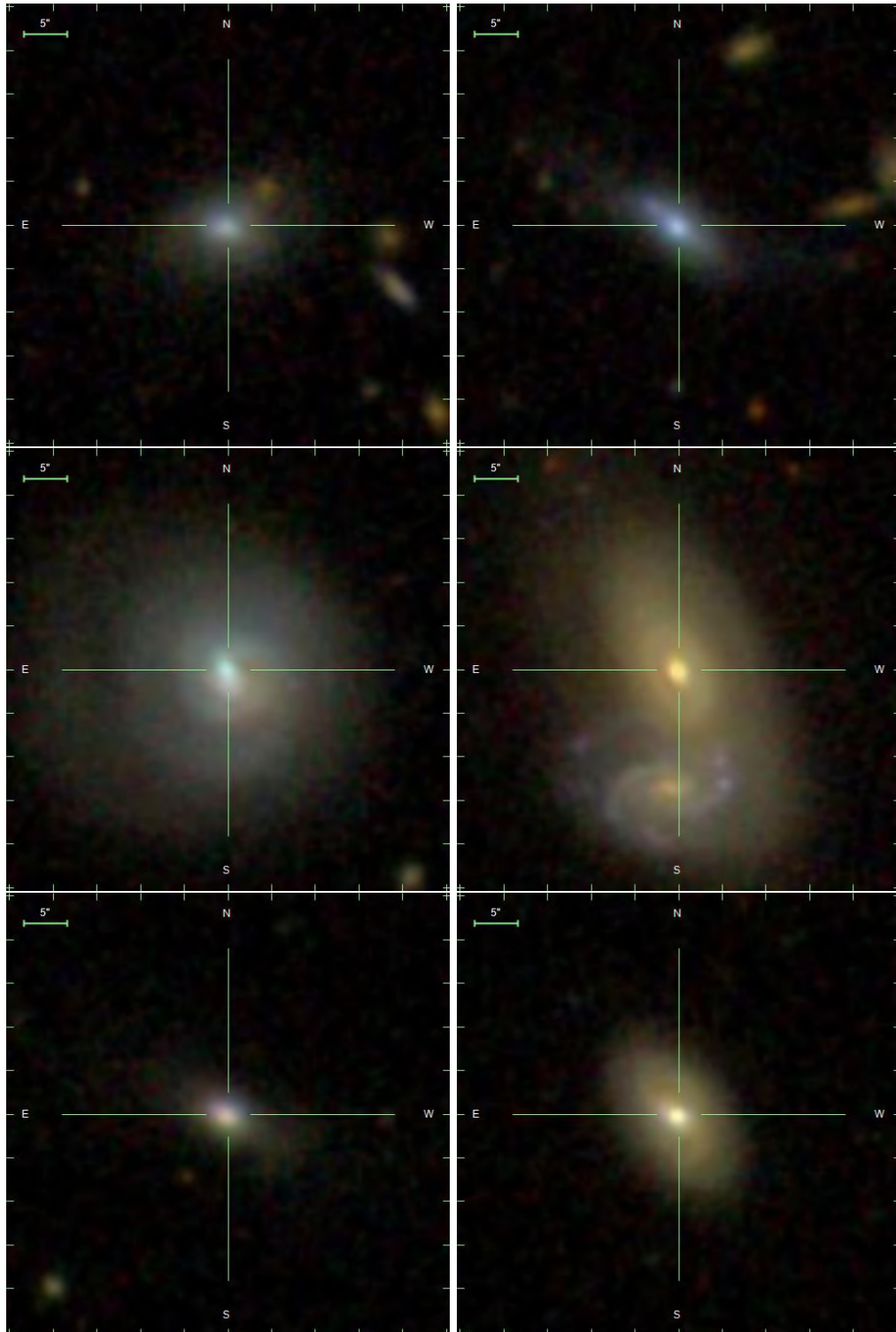


FIGURA 4.2. Imagens do SDSS das MIEGs encontradas no presente trabalho. Na primeira linha temos, da esquerda para a direita: 1, 2; na segunda linha temos, da esquerda pra a direita: 3, 4; na terceira linha temos, da esquerda para a direita: 5, 6. Apesar de visualmente parecer que a galáxia 4 está em processo de fusão, o que explicaria sua alta taxa de formação estelar, as duas galáxias da imagem possuem redshift bem diferentes, e portanto não estão se fundindo.

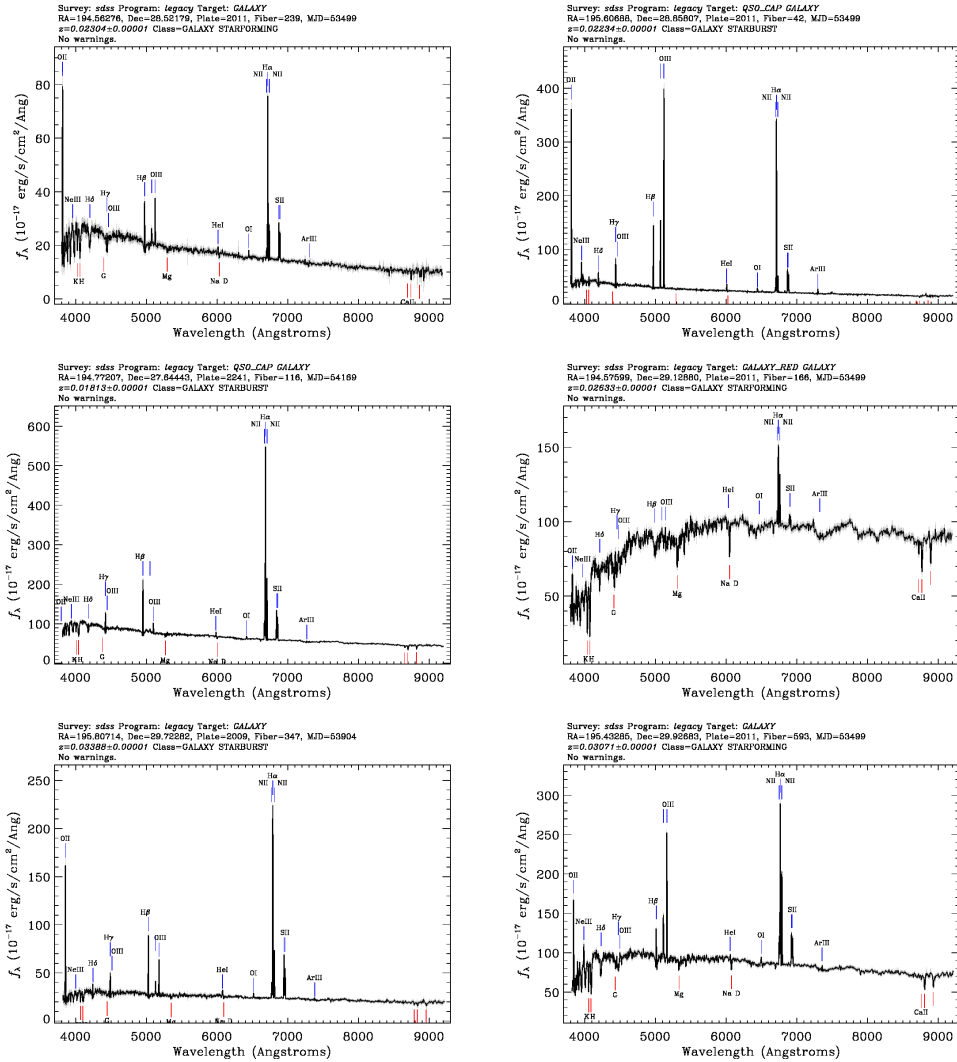


FIGURA 4.3. Espectros do SDSS das MIEGs encontradas no presente trabalho. Na primeira linha temos, da esquerda para a direita: 1, 2; na segunda linha temos, da esquerda pra a direita: 3, 4; na terceira linha temos, da esquerda para a direita: 5, 6. Note que nenhum dos espectros se comportam como o espectro de um ETG típica, mas sim como o de uma LTG típica (Figura 4.6).

MIEGs no Aglomerado de Coma								
nome (J200)	ra (J200)	dec	fracDeV	C	z	Log( $L_{22}/L_{3.4}$ )	Log( $L_{3.4}$ )	Log( $M_{stelar}$ )
1	195.6068	28.8580	0.97	2.88	0.0223	33.80	8.11	8.64
2	194.5627	28.5217	0.81	2.82	0.0230	33.55	8.21	8.98
3	195.8071	29.7228	0.97	2.87	0.0338	33.72	8.62	9.33
4	194.7720	27.6444	0.94	2.86	0.0181	33.54	8.94	9.61
5	195.4328	29.9268	1.00	3.12	0.0307	33.55	9.23	10.15
6	194.5759	29.1287	1.00	2.92	0.0263	32.92	9.62	10.53

TABELA 4.1. Tabela contendo os dados das MIEGs apresentadas nesse trabalho. Note que todas as MIEGs possuem  $\text{fracDeV} \geq 0.8$  e  $C \geq 2.6$ .

Apesar dessa dificuldade em confirmar visualmente a classificação morfológica das

MIEGs, todas elas, assim como as demais ETGs da amostra, passaram pela teste duplo da confirmação morfológica, tendo, todas elas,  $\text{fracDeV} \geq 0.8$  e  $C \geq 2.8$ , como pode ser visto na Tabela 4.1.

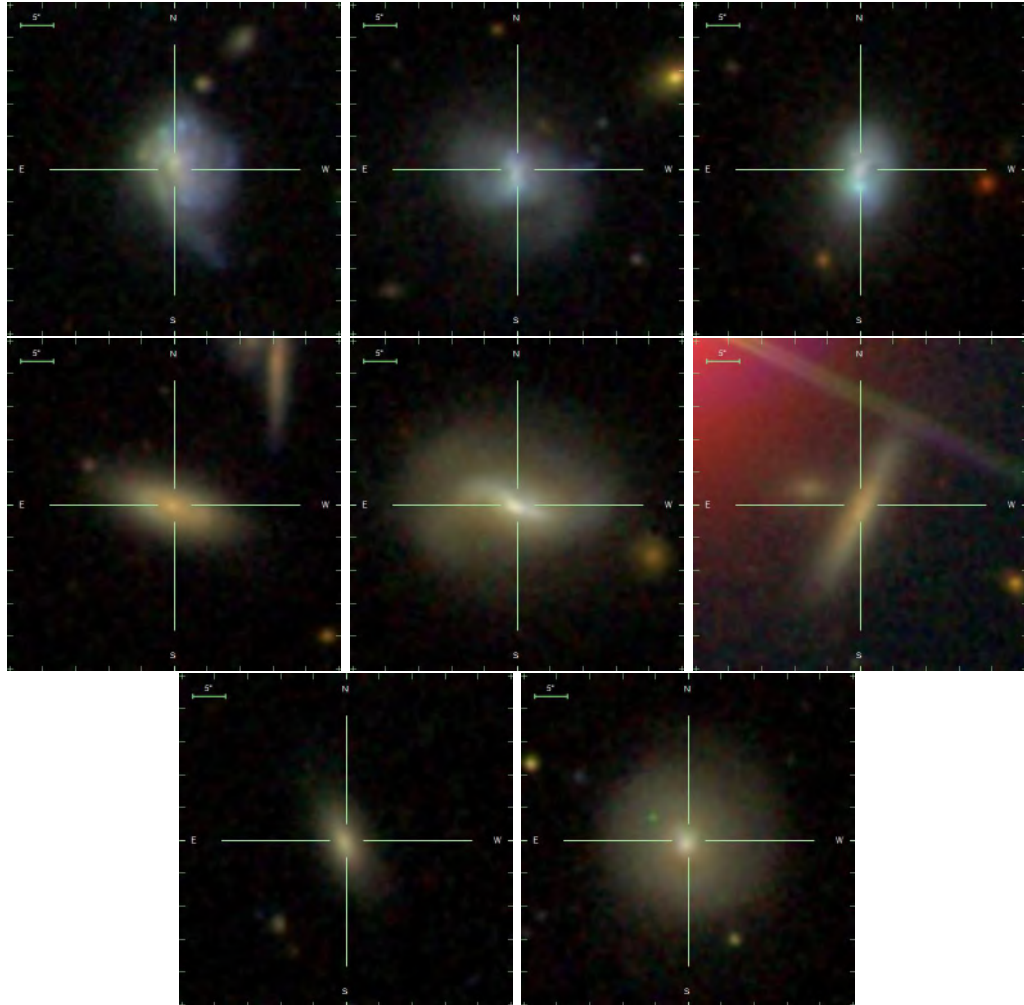


FIGURA 4.4. Imagens do SDSS para as MIEGs de Riguccini et al. (2015). Na primeira linha temos, da esquerda para a direita: C1, C2, C3; na segunda linha temos, da esquerda pra a direita: C4, C5, C8; na terceira linha temos, da esquerda para a direita: C9 e C10

A maior limitação do nosso método está na baixa massa das MIEGs da Figura 4.1. No entanto, estamos confiantes de que essa limitação é devido a baixa quantidade de ETGs detectadas pelo WISE no aglomerado de Coma. Quando fazemos a seleção das galáxias no SDSS, sem exigir uma contrapartida do WISE, temos uma amostra com um total 913 galáxias, sendo que 265 dessas galáxias são classificadas como ETGs pelos critérios da Seção 3.2. Esse é um número consideravelmente maior de galáxias para se trabalhar do que quando exigimos uma contrapartida do WISE (134 no total, sendo apenas 32 ETGs). Isto posto, acreditamos que se tivermos uma maior quantidade de

ETGs disponíveis para fazermos a seleção, nosso método será capaz de selecionar um maior número de candidatos confiáveis (de mais alta massa) de MIEGs.

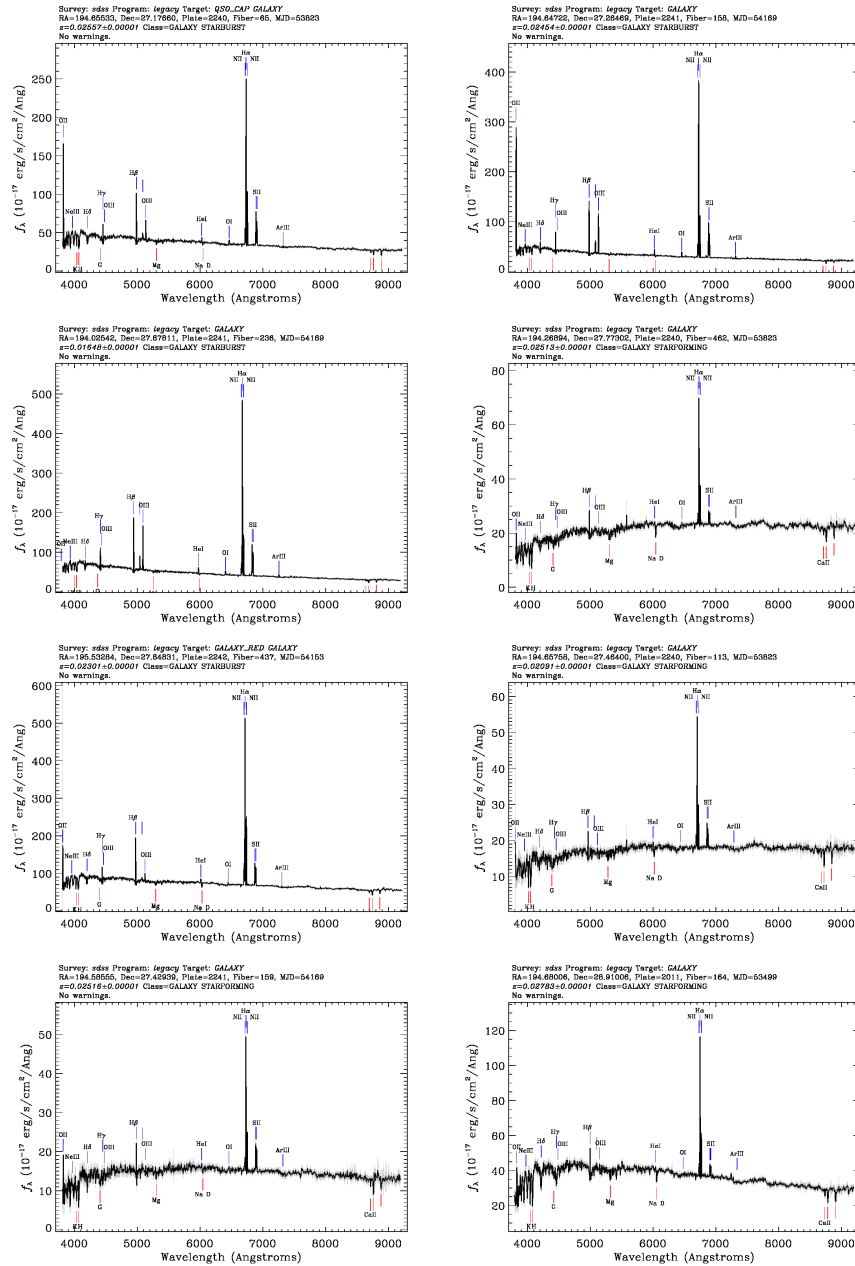


FIGURA 4.5. Espectros do SDSS para as MIEGs de Riguccini et al. (2015). Na primeira linha temos, da esquerda para a direita: C1, C2; na segunda linha temos, da esquerda pra a direita: C3, C4; na terceira linha temos, da esquerda para a direita: C5, C8; na quarta linha temos, da esquerda para a direita: C9, C10. Note que nenhum dos espectros se comportam como o de uma ETG típica (Figura 4.6)

Uma maneira de contornarmos essa deficiência na metodologia seria abandonar a contrapartida do WISE e trabalharmos diretamente com a SFR e a massa estelar diretamente do SDSS. Isso traz vantagens no âmbito da quantidade de fontes disponíveis, no entanto perdemos as vantagens que o WISE nos garante. Assim sendo, entendemos





## Capítulo 5

# Conclusões e Perspectivas

Resumindo, desenvolvemos um método de seleção de ETGs que apresentam alta taxa de formação estelar. Tais galáxias muito provavelmente são objetos passando por um processo de transição que as levarão de objetos com formação estelar para objetos sem formação estelar. Essa seleção de ETGs com alta taxa de formação foi feita utilizando uma razão de luminosidades no infravermelho,  $L_{22\mu m}/L_{3.4\mu m}$ , como indicador da taxa de formação estelar nas galáxias. Nesse contexto, fomos capazes de detectar 6 ETGs (classificadas como tal por terem  $\text{fracDeV} \geq 2.6$  e  $C \geq 0.8$ ) que apresentam alta taxa de formação estelar, tais objetos recebem o nome de MIEGs.

Nossas MIEGs, apesar de apresentarem parâmetros fotométricos que as classificam como ETGs, apresentam alta taxa de formação estelar, o que é algo incomum para esse grupo morfológico, e também apresentam espectros similares aos de galáxias LTG. É fácil notar ao se observar os espectros das MIEGs na Figura 4.3 que estes objetos possuem uma formação estelar intensa, tanto em um passado recente quanto no presente momento. Isso porque, todos os espectros apresentam fortes emissões de  $H_{\alpha}$ , que é um indicadores de formação estelar em andamento Kennicutt (1983)

No entanto, nossas MIEGs apresentam uma baixa massa estelar, com exceção das MIEGs 5 e 6. Devido a dificuldade de se classificar morfológicamente objetos de pouca massa, esse baixo número de MIEGs de alta massa, e portanto com classificação morfológica mais confiável, é a maior limitação da nossa metodologia. Isso provavelmente se deve ao fato de termos um número bem pequeno de galáxia do SDSS com contrapartida no WISE. Das 913 galáxias selecionadas como membro do aglomerado de Coma pelo

método do Shifting Gapper, apenas 134 possuem dados de contrapartida no WISE, e destas 134 apenas 32 são ETGs. Isso nos deixou com um número limitado de fontes para desenvolver nosso estudo.

Nossa perspectiva para o futuro é contornar essa limitação e aperfeiçoar o método de modo a sermos capazes de selecionar ETGs com alta taxa de formação estelar que possuam uma massa estelar maior que  $10^{10} M_{\odot}$ . Este aperfeiçoamento será feito através do uso da Taxa de Formação Estelar Específica (sSFR, em inglês). A sSFR é a taxa de formação estelar por unidade de massa. O SDSS tem desvantagens em relação ao WISE, principalmente no que diz respeito a cobertura do céu (SDSS observa apenas o Hemisfério Norte, e de modo incompleto, enquanto o WISE cobre todo o céu). Em adição, ao utilizarmos a sSFR perdemos a vantagem da estimação da formação estelar através da razão entre duas bandas apenas, que é um modo de estimar formação estelar observacionalmente mais barato. Entretanto, apesar de estar restringido ao hemisfério norte, o SDSS possui o maior levantamento já realizado e com isso fornece uma enorme número de galáxias e aglomerados, de modo que o número de objetos que teremos para trabalhar compensará a restrição na área de observação.

Esse processo já foi iniciado, como mostrado na Figura 5.1. O trabalho encontra-se em um estágio bem inicial e portanto não tiraremos conclusões a respeito dessa pesquisa no momento, no entanto como pode-se ver na Figura 5.1, nossas 6 MIEGs estão presentes juntos com os objetos que formam bastante estrelas. Entretanto, ainda não desenvolvemos um método para separar ETGs com alta taxa de formação estelar de ETGs regulares. Mesmo que isso não se mostre um sucesso em selecionar ETGs de alta massa ( $M > 10^{10} M_{\odot}$ ) com alta taxa de formação estelar, ainda assim será uma vantagem para a metodologia, isso porque ao usarmos apenas dados do SDSS teremos uma amostra muito maior (cerca de 250 ETGs), fazendo com que tenhamos uma maior confiança na validade do nosso método de seleção de ETGs em transição.

Ademais, ao finalizamos o aperfeiçoamento de nossa metodologia partiremos para a fase de aplicá-la em mais aglomerados e assim produzir um catálogo de galáxias em transição. No entanto, nosso interesse não é apenas fornecer um modo de se selecionar galáxias em transição de modo fácil, mas também utilizar essa capacidade de seleção de objeto transitórios para estudarmos esses objetos e entender os processos os levam a ter uma formação estelar diferente de seus semelhantes.

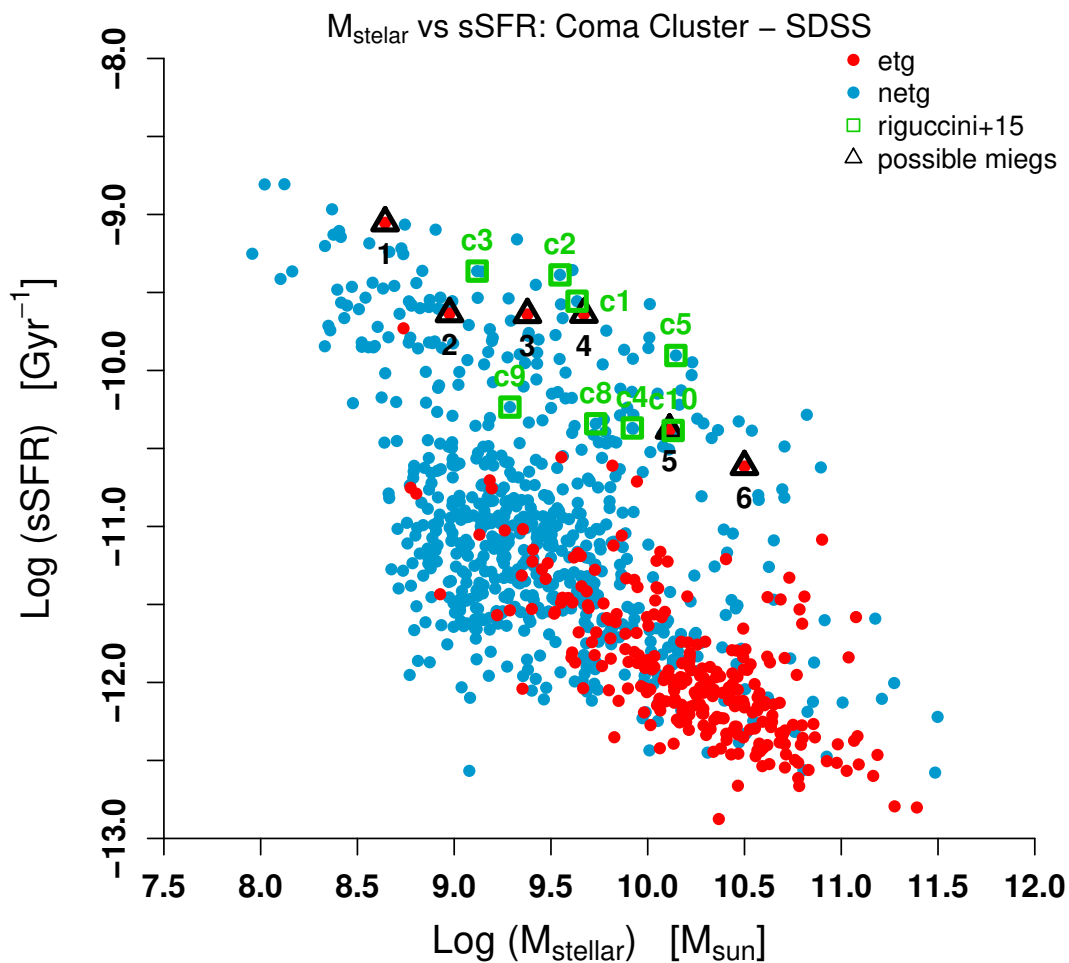


FIGURA 5.1. Diagrama de sSFR vs  $M_{estelar}$  onde podemos ver que nossas MIEGs apresentam uma taxa de formação estelar diferenciada do grupo principal de ETGs. A vantagem de se utilizar sSFR é possuir uma amostra mais completa do que a que tínhamos com o WISE. Em adição as 6 ETGs em transição que foram previamente detectadas, podemos ver que existem outras ETGs que estão destacadas do grupo principal e que portanto são boas candidatas ao posto de ETGs em transição.

## Apêndice A

# Seleção Única Para Múltiplos Aglomerados

É de nosso interesse estudar galáxias em transição em diferentes ambientes de modo a entender qual o papel que ele exerce sobre a formação estelar destas galáxias. Uma primeira tentativa de estudar essa influência já foi realizada.

Selecionamos uma amostra, contendo 355 ETGs pertencentes a 155 aglomerados e 232 ETGs sendo objetos de campo, ou seja, que não pertencem a nenhum aglomerado ou grupo. Também dividimos esta amostra em duas subamostras uma de alta luminosidade e outra de baixo redshift. Essa subdivisão foi feita para evitar efeitos de completude, isto é, queremos que para uma amostra tenhamos fontes de todos os redshifts. Isto não acontecia com a amostra original, como pode ser visto na Figura A.1 a distribuição de luminosidades ficam incompletas em redshifts maiores que  $z > 0.045$ , deste modo dividimos a amostra em:

- Alta Luminosidade  $\rightarrow L_r > 10^{9.9}$ 
  - 314 ETGs em Aglomerados
  - 180 ETGs no Campo
- Baixo Redshift  $\rightarrow z < 0.045$ 
  - 101 ETGs em Aglomerados
  - 72 ETGs no Campo

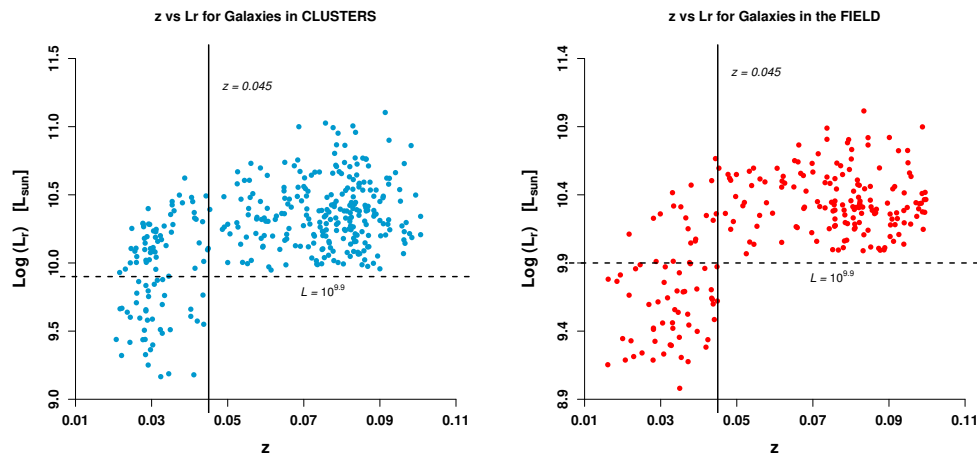


FIGURA A.1. Separação das amostra. No primeiro painel temos as galáxias pertencentes a aglomerados e no segundo painel temos as galáxias pertencentes ao campo. As galáxias acima da linha tracejada são fontes que pertencem a amostra de Alta Luminosidade. As galáxias a esquerda da linha sólida são as fontes que pertencem a amostra de Baixo Redshift. Essas separações são feita para remover a incompletude na da amostra na região abaixo da linha tracejada e a direita da linha sólida.

Após remover a incompletude da amostra, podemos utilizar a razão de luminosidades para determinar a formação estelar e procurar por formação estelar diferenciada nos diferentes ambientes como mostrado na Figura A.2. É válido notar que existem galáxias que estão presentes nas duas amostra, no entanto isso não é um problema, dado que caso ela seja uma MIEG ela sera computada apenas uma vez.

Analisando—se a Figura A.2 é fácil notar que as galáxias ETGs se espalham ao longo da amostra (tanto para o caso das ETGs em aglomerados como para as ETGs no campo), sem demonstrar preferência em se agruparem em uma determinada região como acontece na amostra estudada na Figura 4.1. Desse modo não fomos capazes de selecionar MIEGs quando analisamos múltiplos aglomerados em uma única amostra. Temos duas hipóteses para o resultado negativo: primeiro que existem poucas fontes para cada aglomerado, e portanto essa não é uma amostra representativa; segundo que a taxa de formação estelar pode ser alterada de acordo com o ambiente, e portanto a linha que separa ETGs de alta formação estelar e as regulares pode variar de aglomerado para aglomerado, deixando a distribuição na Figura A.2 impossível de ser separada entre esses dois grupos.

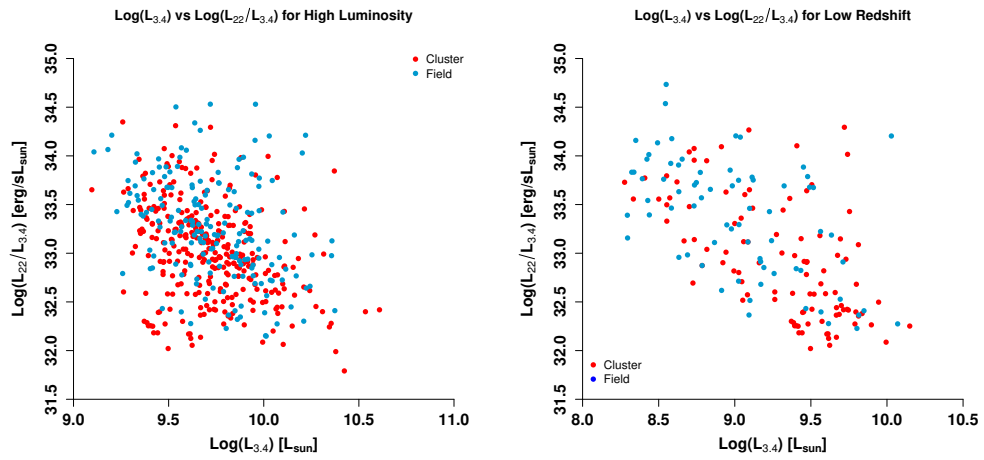


FIGURA A.2. Relação entre  $L_{22\mu m}/L_{3.4\mu m}$  para as amostras Alta Luminosidade (a direita) e para as amostras de Baixo Redshift (a esquerda). Note que em ambos os casos, as ETGs de aglomerados (pontos vermelhos) e as ETGs de campo (pontos azuis) se espalham pelo gráfico como um todo, sem se agruparem em uma região preferencial, impedindo que uma seleção de MIEGs seja feita.

Isso nos leva a concluir que as análises devem ser feitas em aglomerados ricos, ou seja, com uma grande quantidade de galáxias membro. Ademais, a seleção de MIEGs deve ser feita em um aglomerado de cada vez, para que a seleção seja a mais limpa possível.

# Referências Bibliográficas

- M. Bernardi, R. K. Sheth, R. C. Nichol, D. P. Schneider, & J. Brinkmann. Colors, Magnitudes, and Velocity Dispersions in Early-Type Galaxies: Implications for Galaxy Ages and Metallicities. *AJ*, 129:61–72, January 2005. doi: 10.1086/426336.
- M. R. Blanton & J. Moustakas. Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies. *ARA&A*, 47:159–210, September 2009. doi: 10.1146/annurev-astro-082708-101734.
- Y.-Y. Chang, A. van der Wel, E. da Cunha, & H.-W. Rix. Stellar Masses and Star Formation Rates for 1M Galaxies from SDSS+WISE. *ApJS*, 219:8, July 2015. doi: 10.1088/0067-0049/219/1/8.
- A. L. Coil, J. A. Newman, D. Croton, M. C. Cooper, M. Davis, S. M. Faber, B. F. Gerke, D. C. Koo, N. Padmanabhan, R. H. Wechsler, & B. J. Weiner. The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: Color and Luminosity Dependence of Galaxy Clustering at  $z \sim 1$ . *ApJ*, 672:153–176, January 2008. doi: 10.1086/523639.
- S. Cole, P. Norberg, C. M. Baugh, C. S. Frenk, J. Bland-Hawthorn, T. Bridges, R. Cannon, M. Colless, C. Collins, W. Couch, N. Cross, G. Dalton, R. De Propris, S. P. Driver, G. Efstathiou, R. S. Ellis, K. Glazebrook, C. Jackson, O. Lahav, I. Lewis, S. Lumsden, S. Maddox, D. Madgwick, J. A. Peacock, B. A. Peterson, W. Sutherland, & K. Taylor. The 2dF galaxy redshift survey: near-infrared galaxy luminosity functions. *MNRAS*, 326:255–273, September 2001. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04591.x.
- T. A. Davis, L. M. Young, A. F. Crocker, M. Bureau, L. Blitz, K. Alatalo, E. Emsellem, T. Naab, E. Bayet, M. Bois, F. Bournaud, M. Cappellari, R. L. Davies, P. T. de Zeeuw, P.-A. Duc, S. Khochfar, D. Krajnović, H. Kuntschner, R. M. McDermid, R. Morganti, T. Oosterloo, M. Sarzi, N. Scott, P. Serra, & A.-M. Weijmans. The



- ATLAS<sup>3D</sup> Project - XXVIII. Dynamically driven star formation suppression in early-type galaxies. *MNRAS*, 444:3427–3445, November 2014. doi: 10.1093/mnras/stu570.
- G. de Vaucouleurs. Recherches sur les Nebuleuses Extragalactiques. *Annales d’Astrophysique*, 11:247, January 1948.
- G. de Vaucouleurs. General Physical Properties of External Galaxies. *Handbuch der Physik*, 53:311, 1959.
- A. Dressler & J. E. Gunn. Spectroscopy of galaxies in distant clusters. II - The population of the 3C 295 cluster. *ApJ*, 270:7–19, July 1983. doi: 10.1086/161093.
- S. M. Faber. Variations in Spectral-Energy Distributions and Absorption-Line Strengths among Elliptical Galaxies. *ApJ*, 179:731–754, February 1973. doi: 10.1086/151912.
- D. Fadda, M. Girardi, G. Giuricin, F. Mardirossian, & M. Mezzetti. The Observational Distribution of Internal Velocity Dispersions in Nearby Galaxy Clusters. *ApJ*, 473:670, December 1996. doi: 10.1086/178180.
- K. C. Freeman. On the Disks of Spiral and S0 Galaxies. *ApJ*, 160:811, June 1970. doi: 10.1086/150474.
- J. F. W. Herschel. A General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 154:1–137, 1864.
- E. P. Hubble. Extragalactic nebulae. *ApJ*, 64, December 1926. doi: 10.1086/143018.
- R. C. Kennicutt, Jr. The rate of star formation in normal disk galaxies. *ApJ*, 272:54–67, September 1983. doi: 10.1086/161261.
- D. C. Koo, M. A. Bershad, G. D. Wirth, S. A. Stanford, & S. R. Majewski. HST images of very compact blue galaxies at Z approximately 0.2. *ApJ*, 427:L9–L12, May 1994. doi: 10.1086/187352.
- J. Kormendy & S. Djorgovski. Surface photometry and the structure of elliptical galaxies. *ARA&A*, 27:235–277, 1989. doi: 10.1146/annurev.aa.27.090189.001315.
- H. S. Leavitt. 1777 variables in the Magellanic Clouds. *Annals of Harvard College Observatory*, 60:87–108.3, 1908.

- P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, J. L. Kohl-Moreira, & C. Jones. NoSOCS in SDSS - I. Sample definition and comparison of mass estimates. *MNRAS*, 392:135–152, January 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13962.x.
- M. A. Norris, S. Meidt, G. Van de Ven, E. Schinnerer, B. Groves, & M. Querejeta. Being WISE. I. Validating Stellar Population Models and  $M_{\text{star}}/L$  Ratios at 3.4 and 4.6  $\mu\text{m}$ . *ApJ*, 797:55, December 2014. doi: 10.1088/0004-637X/797/1/55.
- F. S. Patterson. The Luminosity Gradient of Messier 33. *Harvard College Observatory Bulletin*, 914:9–10, December 1940.
- L. Riguccini, P. Temi, A. Amblard, M. Fanelli, & F. Brighenti. Mid-IR Enhanced Galaxies in the Coma Virgo Clusters: Lenticulars with a High Star Formation Rate. *ApJ*, 810:138, September 2015. doi: 10.1088/0004-637X/810/2/138.
- S. Salim, M. Dickinson, R. Michael Rich, S. Charlot, J. C. Lee, D. Schiminovich, P. G. Pérez-González, M. L. N. Ashby, C. Papovich, S. M. Faber, R. J. Ivison, D. T. Frayer, J. M. Walton, B. J. Weiner, R.-R. Chary, K. Bundy, K. Noeske, & A. M. Koekemoer. Mid-IR Luminosities and UV/Optical Star Formation Rates at  $z \sim 1.4$ . *ApJ*, 700:161–182, July 2009. doi: 10.1088/0004-637X/700/1/161.
- K. Schawinski, C. M. Urry, B. D. Simmons, L. Fortson, S. Kaviraj, W. C. Keel, C. J. Lintott, K. L. Masters, R. C. Nichol, M. Sarzi, R. Skibba, E. Treister, K. W. Willett, O. I. Wong, & S. K. Yi. The green valley is a red herring: Galaxy Zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies. *MNRAS*, 440:889–907, May 2014. doi: 10.1093/mnras/stu327.
- K. Shimasaku, M. Fukugita, M. Doi, M. Hamabe, T. Ichikawa, S. Okamura, M. Sekiguchi, N. Yasuda, J. Brinkmann, I. Csabai, S.-I. Ichikawa, Z. Ivezić, P. Z. Kunszt, D. P. Schneider, G. P. Szokoly, M. Watanabe, & D. G. York. Statistical Properties of Bright Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey Photometric System. *AJ*, 122:1238–1250, September 2001. doi: 10.1086/322094.
- I. Strateva, Ž. Ivezić, G. R. Knapp, V. K. Narayanan, M. A. Strauss, J. E. Gunn, R. H. Lupton, D. Schlegel, N. A. Bahcall, J. Brinkmann, R. J. Brunner, T. Budavári, I. Csabai, F. J. Castander, M. Doi, M. Fukugita, Z. Györy, M. Hamabe, G. Hennessy, T. Ichikawa, P. Z. Kunszt, D. Q. Lamb, T. A. McKay, S. Okamura, J. Racusin, M. Sekiguchi, D. P. Schneider, K. Shimasaku, & D. York. Color Separation of Galaxy

- Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data. *AJ*, 122:1861–1874, October 2001. doi: 10.1086/323301.
- P. Temi, F. Brighenti, & W. G. Mathews. Spitzer Observations of Transient, Extended Dust in Two Elliptical Galaxies: New Evidence of Recent Feedback Energy Release in Galactic Cores. *ApJ*, 666:222–230, September 2007. doi: 10.1086/520123.
- D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, J. A. Bakken, R. Barkhouser, S. Bastian, E. Berman, W. N. Boroski, S. Bracker, C. Briegel, J. W. Briggs, J. Brinkmann, R. Brunner, S. Burles, L. Carey, M. A. Carr, F. J. Castander, B. Chen, P. L. Colestock, A. J. Connolly, J. H. Crocker, I. Csabai, P. C. Czarapata, J. E. Davis, M. Doi, T. Dombeck, D. Eisenstein, N. Ellman, B. R. Elms, M. L. Evans, X. Fan, G. R. Federwitz, L. Fiscelli, S. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, B. Gillespie, J. E. Gunn, V. K. Gurbani, E. de Haas, M. Haldeman, F. H. Harris, J. Hayes, T. M. Heckman, G. S. Hennessey, R. B. Hindsley, S. Holm, D. J. Holmgren, C.-h. Huang, C. Hull, D. Husby, S.-I. Ichikawa, T. Ichikawa, Ž. Ivezić, S. Kent, R. S. J. Kim, E. Kinney, M. Klaene, A. N. Kleinman, S. Kleinman, G. R. Knapp, J. Korienek, R. G. Kron, P. Z. Kunszt, D. Q. Lamb, B. Lee, R. F. Leger, S. Limmongkol, C. Lindenmeyer, D. C. Long, C. Loomis, J. Loveday, R. Lucinio, R. H. Lupton, B. MacKinnon, E. J. Mannery, P. M. Mantsch, B. Margon, P. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, A. Merelli, D. G. Monet, J. A. Munn, V. K. Narayanan, T. Nash, E. Neilson, R. Neswold, H. J. Newberg, R. C. Nichol, T. Nicinski, M. Nonino, N. Okada, S. Okamura, J. P. Ostriker, R. Owen, A. G. Pauls, J. Peoples, R. L. Peterson, D. Petravick, J. R. Pier, A. Pope, R. Pordes, A. Prosapio, R. Rechenmacher, T. R. Quinn, G. T. Richards, M. W. Richmond, C. H. Rivetta, C. M. Rockosi, K. Ruthmansdorfer, D. Sandford, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, M. Sekiguchi, G. Sergey, K. Shimasaku, W. A. Siegmund, S. Smee, J. A. Smith, S. Snedden, R. Stone, C. Stoughton, M. A. Strauss, C. Stubbs, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, G. P. Szokoly, A. R. Thakar, C. Tremonti, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. Vanden Berk, M. S. Vogeley, P. Waddell, S.-i. Wang, M. Watanabe, D. H. Weinberg, B. Yanny, N. Yasuda, & SDSS Collaboration. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *AJ*, 120: 1579–1587, September 2000. doi: 10.1086/301513.