

Felipe Schmidt Lohmann

**Busca por relíquias: galáxias massivas e compactas no Universo local**

Porto Alegre

2019



Felipe Schmidt Lohmann

**Busca por relíquias: galáxias massivas e compactas no  
Universo local**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título  
de Bacharel em Física.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Física

Departamento de Astronomia

Orientador: Allan Schnorr Müller

Porto Alegre

2019

Felipe Schmidt Lohmann

Busca por relíquias: galáxias massivas e compactas no Universo local/ Felipe Schmidt Lohmann. – Porto Alegre, 2019-

55p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Allan Schnorr Müller

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Física

Departamento de Astronomia, 2019.

Evolução de galáxias, Cinemática, Mergers, Galáxias relíquias 1. Evolução de galáxias. 2. Cinemática. 3. *Mergers*. 4. Galáxias relíquias I. Allan Schnorr Müller. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. III. Instituto de Física. IV. Título

Felipe Schmidt Lohmann

## **Busca por relíquias: galáxias massivas e compactas no Universo local**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título  
de Bacharel em Física.

Trabalho aprovado. Porto Alegre, 18 de dezembro de 2019:

---

**Allan Schnorr Müller**  
Orientador

---

**Professora Dra. Marina Trevisan**  
Convidada

---

**Dra. Hekatelyne Prestes Carpes**  
Convidada

Porto Alegre  
2019



# Agradecimentos

Meus agradecimentos vão àqueles que tornaram possível essa aventura maluca chamada Graduação em Física.

Aos meus pais, Rudi e Marlene, que mesmo sem entender direito o que estudei nesses anos me apoiaram do início ao fim, e ao meu irmão Eduardo pela parceria dos fins de semana.

Aos demais familiares, em especial meus avós Hilma e Urbano, que conservaram a pureza em seus corações e cujas vidas de árduas batalhas servem de inspiração a todos nós descendentes.

A todos os amigos e amigas, em especial à gurizada do AP 42 que, juntos, enfrentamos simbioticamente as dificuldades de morar longe de casa. Tal círculo de amigos é um privilégio para poucos.

Aos orientadores que tive durante a graduação, Basílio e Allan, pelos ensinamentos de vida e acadêmicos. Um agradecimento especial ao Allan pela disponibilidade para tirar dúvidas, seja durante a semana, ou domingos e feriados à noite.

Por fim, um reconhecimento à UFRGS pela excelência e às agências de fomento à pesquisa, FAPERGS, FAPESP, CAPES e CNPq, pelo importante trabalho de incentivo à pesquisa científica brasileira.

Estão todos em meu coração.



*“ Heaven and earth will pass away,  
but my words will never pass away.  
Matthew 24:35*



# Resumo

Observações em alto *redshift* revelam que uma população de galáxias massivas e quiescentes (chamadas *red nuggets*) já existia há 10 bilhões de anos. Essas galáxias são consideradas as progenitoras de galáxias quiescentes massivas do Universo local, porém, quando comparadas à elas, mostram diferenças significativas: elas são muito mais compactas, mais alongadas e muitas possuem discos. Simulações sugerem que a evolução no tamanho deve-se principalmente a *minor mergers*, embora outros processos físicos também possam estar envolvidos. Assim, o estudo desses objetos é crucial para entender a formação de galáxias massivas. Porém, apenas propriedades globais de *red nuggets* são conhecidas, pois estudos espectroscópicos espacialmente resolvidos desses objetos não são possíveis com a atual geração de telescópios. Como *mergers* ocorrem de maneira estocástica, espera-se que exista uma população de galáxias no universo local que não tenham passado por esses processos desde que se tornaram quiescentes. Essas galáxias, chamadas galáxias relíquias, são análogos locais das *red nuggets* de alto *redshift*. Neste trabalho, apresento uma análise de galáxias massivas compactas locais para avaliar se suas propriedades são consistentes com o que é esperado para galáxias relíquias. Esta análise é baseada em dados de espectroscopia de campo integral (IFS) do levantamento astronômico *Mapping Near Galaxies at Apache Point Observatory* (MaNGA) do projeto *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Foi feita uma análise da cinemática das galáxias massivas compactas, a fim de comparar com o que é sabido da literatura para galáxias relíquias e *red nuggets* em  $z \sim 2$ . Observou-se que galáxias compactas exibem, em média, um suporte rotacional maior do que uma amostra de controle de galáxias *early-type* de tamanhos normais, ao mesmo tempo que possuem propriedades cinemáticas consistentes com não terem sofrido *dry mergers*. Isso está de acordo com um cenário em que esses objetos têm um histórico de poucas ocorrências de *minor mergers* desde que se tornaram quiescentes, tornando-os candidatos a serem galáxias relíquias.

**Palavras-chave:** Evolução de galáxias. Cinemática. *Mergers*. Galáxias relíquias.



# Abstract

Observations at high redshift reveal that a population of massive, quiescent galaxies (called red nuggets) already existed 10 billion years ago. These galaxies are thought to be the progenitors of local massive quiescent galaxies. However, compared to their local universe counterparts, these objects show significant distinctions: they are very compact, more elongated and many have disks. Simulations suggest that this evolution in size is mainly due to minor mergers, although other physical processes may be involved as well. Thus, the study of these objects is crucial to understand the formation of massive galaxies. However, only global properties of red nuggets are known, since spatially resolved spectroscopic studies are not feasible with the current generation of telescopes. Since mergers occur in a stochastic manner, it is expected that there exists a population of galaxies in the local universe that have not gone through these processes since they became quiescent. These galaxies, called relic galaxies, are local analogues of the high redshift red nuggets. In this work I present an analysis of local massive compact galaxies to assess if their properties are consistent with those expected for relic galaxies. This analysis is based on integral field spectroscopy (IFS) data from the Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory (MaNGA) astronomical survey from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) project. We characterized the kinematics of massive compact galaxies in order to compare with what is known about relic galaxies in the literature. We find that compact galaxies exhibit, on average, a higher rotational support than a control sample of average sized early-type galaxies, as well as kinematic features consistent with them not having suffered a significant number of dry mergers in their history. This is in agreement with a scenario in which these objects have a quiet minor merging history since they became quiescent, rendering them candidates for relic galaxies.

**Keywords:** Galaxy evolution. Kinematics. Mergers. Relic galaxies.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de Hubble para a classificação de galáxias. Fonte: Hubble, Kirshner e Carroll (2013). . . . .	21
Figura 2 – Diagrama cor-magnitude construído por Schawinski et al. (2014) mostrando a <i>blue cloud</i> , a <i>red sequence</i> e o <i>green valley</i> . . . . .	23
Figura 3 – Taxa de formação estelar em função do <i>redshift</i> usando medidas combinadas de luminosidade do infravermelho e ultravioleta distante. Observa-se que o pico de formação estelar ocorreu em $z \sim 2$ . Fonte: Madau e Dickinson (2014) . . . . .	24
Figura 4 – Tamanho de galáxias representativas de diferentes <i>redshifts</i> . Fonte: Buitrago et al. (2008) . . . . .	25
Figura 5 – Observações de seis galáxias interagindo, representando diferentes estágios do processo de <i>merger</i> . Crédito da imagem: ESA/Hubble . . . . .	27
Figura 6 – Imagem de uma galáxia da amostra observada pelo SDSS. O hexágono em magenta representa o campo observado pelo MaNGA. Fonte: Cherinka et al. (2019). . . . .	32
Figura 7 – Relação tamanho-massa estelar para galáxias <i>early-type</i> (em vermelho) e <i>late-type</i> (em azul). Os pontos representam a mediana da distribuição e as linhas representam um desvio padrão. Fonte: (VAN DER WEL et al., 2014) . . . . .	33
Figura 8 – Ajuste feito pelo pPXF para um espectro arbitrário. A linha preta é o espectro observado, a linha vermelha é o ajuste e os pontos verdes são os resíduos do ajuste. . . . .	34
Figura 9 – Exemplo de curva de rotação com ajuste do modelo de disco exponencial. . . . .	35
Figura 10 – Mapas de velocidade, dispersão de velocidades, $h_3$ e $h_4$ obtidos após rodar o pPXF para uma galáxia de controle. Esta galáxia de controle apresenta pouca rotação, alta dispersão de velocidades em todo o campo e nenhuma correlação entre a velocidade e $h_3$ . . . . .	38
Figura 11 – Mapas cinemáticos para uma galáxia quiescente compacta. Esta galáxia apresenta apresenta alta rotação, dispersão de velocidades concentrada e possui anticorrelação entre $V$ e $h_3$ . . . . .	38
Figura 12 – Suporte rotacional ( $V_{\max}/\sigma_0$ ) em função da massa e da dispersão de velocidades central para a amostra de galáxias compactas. . . . .	39
Figura 13 – Suporte rotacional ( $V_{\max}/\sigma_0$ ) em função da massa e da dispersão de velocidades central para a amostra de galáxias compactas. . . . .	39

Figura 14 – Suporte rotacional em função de $\sigma_0$ para a amostra de galáxias compactas e para a amostra de galáxias em $z \sim 0.8$ analisadas por Bezanson et al. (2018). . . . .	41
Figura 15 – Suporte rotacional em função da dispersão de velocidades central para galáxias com probabilidade maior que 50% de serem elípticas. . . . .	42
Figura 16 – Suporte rotacional em função da dispersão de velocidades central para galáxias com probabilidade maior que 50% de serem tipo S0. . . . .	42
Figura 17 – Relação entre o suporte rotacional e $h_3$ para duas galáxias representativas dos demais objetos da amostra. o sombreado representa densidade de pontos. A galáxia 1-277161 mostra uma forte anticorrelação entre $h_3$ e $V/\sigma$ , o que sugere que foi formada em um major merger rico em gás. Já a galáxia 1-378428 não apresenta tal correlação, o que sugere que esse objeto passou por um major merger pobre em gás. . . . .	43
Figura 18 – Suporte rotacional em função da dispersão de velocidades para galáxias com $\tau < -0.3$ , isto é, com anticorrelação entre $h_3$ e $V/\sigma$ . . . . .	43

# Lista de abreviaturas e siglas

CMD	<i>Color-magnitude Diagram</i>
$\Lambda$ CDM	<i>Lambda Cold Dark Matter</i>
SDSS	<i>Sloan Digital Sky Survey</i>
MaNGA	<i>Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory</i>
pPXF	<i>Penalized Pixel-Fitting</i>
SSP	<i>Simple Stellar Population</i>
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
IFU	<i>Integral Field Unit</i>



# Lista de símbolos

$z$	<i>Redshift</i>
$R_e$	Raio efetivo
$M_{\odot}$	Massa solar
$L_{\odot}$	Luminosidade solar
$f_{\text{gas}}$	Fração de gás
$V$	Velocidade
$\sigma$	Desvio padrão ou dispersão de velocidades
$h_3$	Terceiro momento de Gauss-Hermite
$h_4$	Quarto momento de Gauss-Hermite
$\tau$	Coefficiente de correlação tau de Kendell



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>O Universo em alto redshift</b>	<b>23</b>
1.1.1	Taxa de Formação Estelar	23
1.1.2	Propriedades estruturais	24
1.1.3	Propriedades dinâmicas	25
<b>1.2</b>	<b>Evolução de galáxias</b>	<b>26</b>
1.2.1	Observações	26
1.2.2	Simulações	27
<b>1.3</b>	<b>Motivação e Objetivo</b>	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>31</b>
<b>2.1</b>	<b>Seleção das amostras</b>	<b>31</b>
2.1.1	Amostra de galáxias massivas compactas	31
2.1.2	Amostra de controle	32
<b>2.2</b>	<b>Medidas de cinemática</b>	<b>32</b>
<b>2.3</b>	<b>Análise de dados</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Suporte rotacional</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Comparação entre <math>h_3</math> e <math>V/\sigma</math></b>	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>Discussão</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE A – POLINÔMIOS DE GAUSS-HERMITE</b>	<b>55</b>



# 1 Introdução

Galáxias são objetos muito diversos, de modo que para caracterizá-las são necessários diversos parâmetros. A seguir, estão listados alguns dos principais parâmetros usados para caracterizar galáxias, em particular aqueles que serão importantes para a discussão dos resultados.

1. **Morfologia:** facilmente observa-se que existem dois tipos bastante distintos de galáxias no Universo no que diz respeito a sua aparência: galáxias elípticas e espirais. Galáxias elípticas (também chamadas galáxias *early-type*) são sistemas elipsoidais, geralmente um pouco achatados cujas estrelas estão, em sua maioria, em movimentos aleatórios em torno do centro de massa da galáxia. Galáxias espirais (ou galáxias *late-type*), por outro lado, possuem discos bastante achatados cujo movimento de rotação em torno do centro é organizado. Essas duas classes de objetos ainda podem ser divididas em categorias que caracterizam o achatamento (no caso das elípticas) e os braços espirais (no caso das espirais) segundo a Classificação de Hubble (Figura 1). Por completeza, existem também galáxias que não são nem espirais nem elípticas, as chamadas galáxias anãs.
2. **Luminosidade e Massa Estelar:** Galáxias abrangem um enorme intervalo de luminosidade: as mais brilhantes atingem luminosidades da ordem de  $10^{12}L_{\odot}$ , onde  $L_{\odot}$  denota a luminosidade do Sol, enquanto que as mais fracas têm luminosidade da ordem de apenas  $10^3L_{\odot}$ . A luminosidade total está relacionada com o total de estrelas da galáxia, e portanto com a sua massa estelar total.

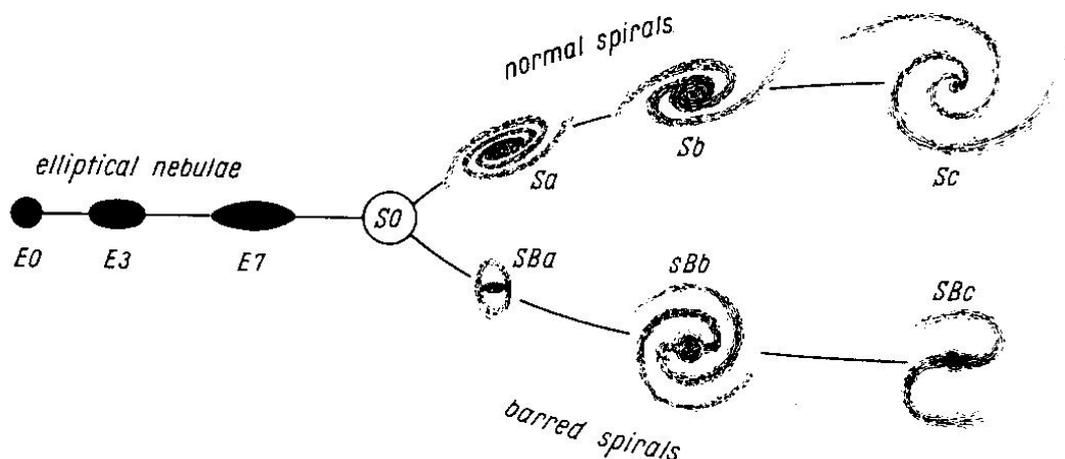


Figura 1 – Diagrama de Hubble para a classificação de galáxias. Fonte: [Hubble, Kirshner e Carroll \(2013\)](#).

3. **Cor:** A cor de uma galáxia está relacionada com as idades e metalicidades de suas populações estelares. Em geral, cores vermelhas refletem populações estelares velhas ou ricas em metais (ou ambos), e cores azuis refletem populações jovens ou pobres em metais (ou ambos).
4. **Tamanho:** O tamanho de uma galáxia não é um parâmetro bem determinado, visto que galáxias não têm fronteiras bem definidas. Uma medida comumente usada é o raio que contém certa fração da luminosidade (ou, às vezes, massa) total. Em particular, chama-se **raio efetivo**  $R_e$  o raio quando essa fração é 0.5. O tamanho de uma galáxia carrega um significado físico importante: para galáxias com disco, que são suportadas por rotação, os tamanhos são uma medida dos seus *momenta* angulares específicos. Para galáxias elípticas, que são suportadas por movimentos aleatórios, seus tamanhos estão relacionados com a dissipação de energia durante suas formações.
5. **Fração de gás:** Outro parâmetro útil para caracterizar uma galáxia é sua fração de massa composta por gás frio, definida como  $f_{\text{gás}} = M_{\text{gás}} / (M_{\text{gás}} + M_{\star})$ , onde  $M_{\text{gás}}$  e  $M_{\star}$  são a massa de gás frio e a massa estelar, respectivamente. Essa razão relaciona-se com a eficiência com que gás frio se transforma em estrelas, e determina propriedades cinemáticas no cenário de formação de galáxias.
6. **Redshift ( $z$ ):** Devido a expansão do Universo, a luz que viaja pelo espaço sofre um aumento no seu comprimento de onda, deslocando-se para o vermelho. Como a luz vinda de galáxias de alto *redshift* foi emitida quando o Universo era mais jovem, pode-se estudar a evolução de galáxias observando diferentes populações de galáxias em diferentes *redshifts*.

Quando uma população de galáxias em um dado *redshift* é distribuída em um gráfico de cor *versus* luminosidade, obtém-se o chamado **diagrama cor-magnitude**. Um exemplo pode ser visto na [Figura 2](#). As galáxias ficam divididas em três regiões: a *red sequence*, que contém a maioria das galáxias elípticas, a *blue cloud*, que contém a maioria das galáxias espirais, e o *green valley*, que é uma região de transição entre as duas primeiras. Esta última é uma região pouco populada do diagrama, e suas galáxias são muito estudadas para entender o *quenching*, isto é, como galáxias perdem seu gás frio e param de formar estrelas.

A distribuição bimodal das galáxias no diagrama cor-magnitude sugere que há dois tipos de formação de galáxias distintos. Portanto, é imprescindível traçar o diagrama cor-magnitude para tempos anteriores e determinar há quanto tempo essa bimodalidade existe. [Williams et al. \(2009\)](#) identifica a bimodalidade até  $z \sim 2.5$ .

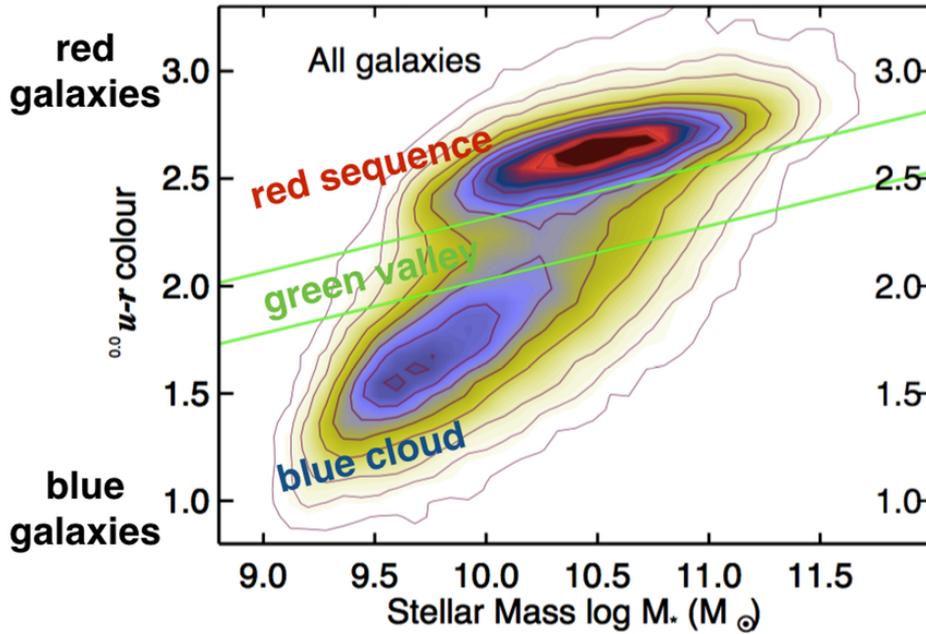


Figura 2 – Diagrama cor-magnitude construído por [Schawinski et al. \(2014\)](#) mostrando a *blue cloud*, a *red sequence* e o *green valley*.

## 1.1 O Universo em alto redshift

Já que galáxias em alto *redshift* são mais jovens, pode-se comparar as propriedades de galáxias em diferentes *redshifts* para estudar a formação e evolução de galáxias. Entretanto, uma galáxia com um dado tamanho e luminosidade é mais fraca e menos resolvível quanto maior o *redshift* em que ela estiver localizada, e portanto é mais difícil de estudá-la. Antes da década de 1990, pouco se sabia sobre galáxias com  $z \sim 1$ , podendo-se detectar apenas quasares e radiogaláxias devido a suas altas luminosidades. Desde então, telescópios e detectores sofreram vários avanços tecnológicos que permitiram que atualmente seja possível detectar galáxias até  $z \sim 10$  ([BOUWENS et al., 2019](#)).

A seguir, algumas propriedades de galáxias de alto *redshift* são discutidas.

### 1.1.1 Taxa de Formação Estelar

Para galáxias com  $z > 2$ , medidas de luz integrada que traça populações estelares jovens são utilizadas para inferir a taxa com que estrelas estão sendo formadas. Essas medidas de luminosidade incluem comprimentos de onda de repouso do ultravioleta e infravermelho, linhas de emissão que traçam a recombinação do hidrogênio, entre outros. A medida mais comumente usada é a razão entre contínuo do ultravioleta e o intervalo

entre  $1500 - 2800\text{\AA}$ , que é dominada por estrelas do tipo O e B. A Figura 3 mostra o histórico de taxa de formação estelar do Universo.

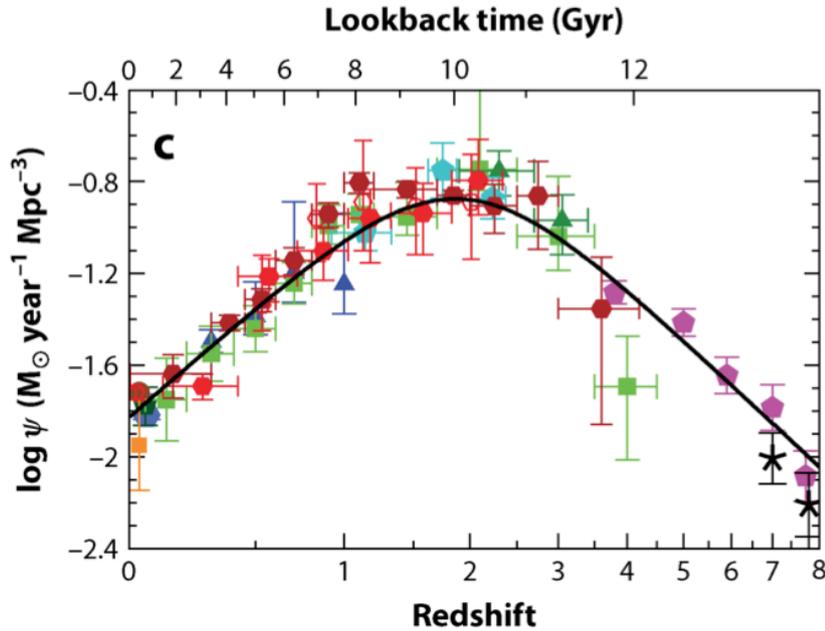


Figura 3 – Taxa de formação estelar em função do *redshift* usando medidas combinadas de luminosidade do infravermelho e ultravioleta distante. Observa-se que o pico de formação estelar ocorreu em  $z \sim 2$ . Fonte: Madau e Dickinson (2014)

O Universo era, portanto, muito mais ativo no passado: estrelas eram formadas em uma taxa aproximadamente 9 vezes maior do que é observado no Universo local.

### 1.1.2 Propriedades estruturais

Em geral, as morfologias das galáxias em  $z \geq 1$  possuem diferenças importantes em relação às das galáxias locais. Primeiro, a sequência de Hubble, mostrada na Figura 1, ainda não era estabelecida em  $z \sim 2$ , pois havia um número muito maior de galáxias irregulares, sem forma definida (LOTZ et al., 2006).

Galáxias *star-forming* em  $z \geq 1$  apresentam sobredensidades (chamados *clumps*) em seus discos, com tamanhos de  $\sim 1\text{kpc}$  e contribuindo com até 40% da luz UV emitida (ELMEGREEN et al., 2009). Isso torna difícil descrever o perfil de brilho da galáxia usando um perfil de Sérsic (SÉRSIC, 1963). Acredita-se que a formação desses *clumps* acontece devido a instabilidades em discos ricos em gás e turbulentos (BOURNAUD; ELMEGREEN, 2009).

Além disso, tanto galáxias *star-forming* quanto quiescentes eram mais compactas para massas estelares fixas, como mostrado na Figura 4. A evolução na relação massa-raio é ainda mais dramática para galáxias quiescentes, de modo que em  $z \sim 1.5 - 2$  elas têm raios

$\sim 2 - 5$  vezes menores do que galáxias *early-type* locais com a mesma massa (BUITRAGO et al., 2008). Por exemplo, galáxias quiescentes em  $z \sim 2$  com massa estelar  $M_* \sim 10^{11} M_\odot$  têm raios efetivos da ordem  $R_e \sim 2 \text{ kpc}$ , enquanto que localmente mede-se  $R_e \sim 7 \text{ kpc}$  para galáxias de mesma massa (VAN DER WEL et al., 2014).

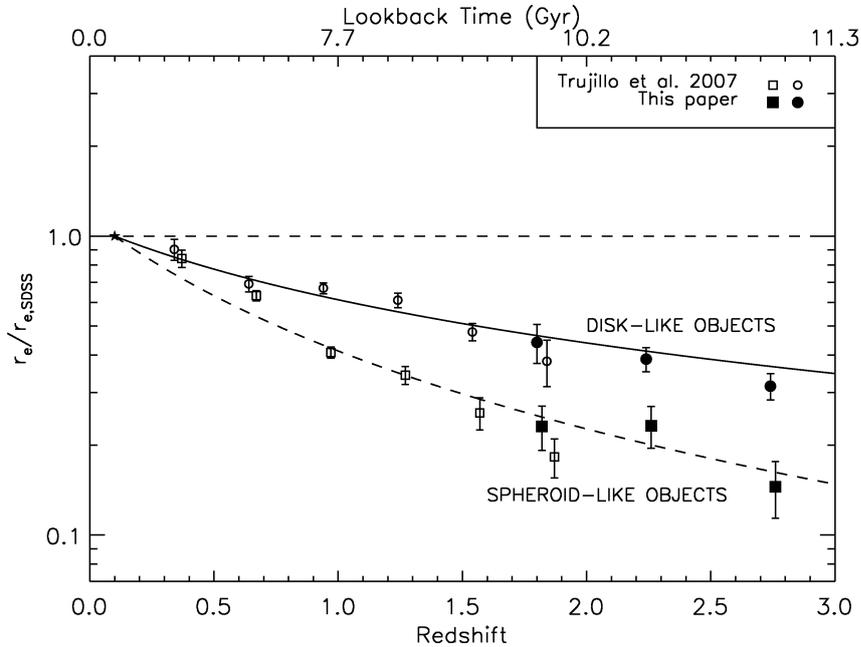


Figura 4 – Tamanho de galáxias representativas de diferentes *redshifts*. Fonte: Buitrago et al. (2008)

### 1.1.3 Propriedades dinâmicas

As propriedades dinâmicas de uma galáxia que são comumente observadas são mapas de velocidade, que determinam a direção de movimento do material observado, e mapas de dispersão de velocidades, que quantificam os movimentos aleatórios. Esses parâmetros podem ser utilizados como dados de entrada para algum modelo dinâmico, ou então analisados de maneira empírica.

Galáxias *star-forming* em alto *redshift* apresentam alta turbulência no meio interestelar, de modo que a quantidade  $v_{\text{rot}}/\sigma$  é consideravelmente menor do que para galáxias locais (SIMONS et al., 2017; SCHREIBER et al., 2009). Galáxias quiescentes, por outro lado, são mais difíceis de extrair mapas cinemáticos: enquanto galáxias *star-forming* possuem linhas de emissão intensas que podem ser usadas para extrair a cinemática, para galáxias quiescentes somente é possível analisar a cinemática a partir do contínuo estelar, cujo fluxo é baixo para galáxias de alto *redshift*. Alguns trabalhos conseguiram contornar esse problema ao observar galáxias quiescentes lenteadas (NEWMAN et al., 2018) e observando galáxias análogas no Universo local (YILDIRIM et al., 2017). Esses trabalhos mostraram que esses objetos apresentam alta dispersão de velocidades central ( $\sigma_0 \sim 300 \text{ km/s}$ ), e altas velocidades de rotação com  $V_{\text{max}}$  chegando a  $350 \text{ km/s}$ .

## 1.2 Evolução de galáxias

No modelo cosmológico atual ( $\Lambda$ CDM), a estrutura em grande escala do Universo cresce devido a atração gravitacional de pequenas sobredensidades na distribuição de massa do Universo primordial. Neste cenário, galáxias se formam a medida que matéria bariônica (gás) esfria e é atraída para o centro de halos de matéria escura, e assim cresce por meio de acreção e fusões, levando a um cenário hierárquico de acumulação de matéria galáctica. Em seguida serão discutidos brevemente alguns tópicos relevantes à evolução de galáxias, em especial interações mútuas entre galáxias e o comportamento da taxa de formação estelar ao longo do tempo.

### 1.2.1 Observações

Galáxias e halos de matéria escura não vivem isolados no Universo, podendo atrair gravitacionalmente outras galáxias e halos e interagirem entre si. Uma colisão<sup>1</sup> entre galáxias é chamada de *merger*, e a atração gravitacional entre as estrelas e o atrito entre o gás e poeira acarretam grandes mudanças para as galáxias envolvidas. Exemplos de *mergers* são mostrados na [Figura 5](#)

Esse é um fenômeno que depende de muitas condições iniciais, como o tamanho, o conteúdo de gás, a orientação relativa e o *momentum* angular dos interagentes. Abaixo, algum dos tipos de *mergers* que são comumente estudados:

- **Minor merger:** quando uma das galáxias é significativamente menos massiva que a outra, tipicamente com razão menor que 1:4. A galáxia maior geralmente "absorve" a menor, diminuindo um pouco a rotação organizada da galáxia maior se esta for espiral ([BOURNAUD; JOG; COMBES, 2007](#)).
- **Major merger:** quando as duas galáxias têm aproximadamente a mesma massa. Nesse caso, o movimento ordenado de galáxias espirais é praticamente destruído. A galáxia restante após a interação pode ser elíptica ou espiral, dependendo da fração de gás das galáxias interagentes.
- **Wet merger:** quando as galáxias interagentes são ricas em gás. Essas interações produzem surtos de formação estelar, mas não são eficientes em diminuir o *momentum* angular e destruir discos ([HOPKINS et al., 2009](#)).
- **Dry merger:** quando as galáxias são pobres em gás. Geralmente não mudam a taxa de formação estelar e tendem a formar bojos massivos, favorecendo a formação de galáxias elípticas ([HOPKINS et al., 2010](#)).

<sup>1</sup> Uma colisão entre galáxias é tratada como um choque não-colisional, visto que as estrelas individuais são muito pequenas comparadas com a dimensão dos meios interestelares.



Figura 5 – Observações de seis galáxias interagindo, representando diferentes estágios do processo de *merger*. Crédito da imagem: ESA/Hubble<sup>2</sup>

Observações sugerem que galáxias evoluem de estruturas espirais para elípticas via *mergers*. Porém, a taxa atual de *mergers* não explica a bimodalidade da Figura 2, isto é, como todas as galáxias vão da *blue cloud* para a *red sequence*, nem como as galáxias deixam de formar estrelas. Esse fenômeno chama-se *quenching* (cessação da formação estelar), e é um tema atual de pesquisa em Astrofísica. O *quenching* é um fenômeno distinto da redução gradual da formação estelar em galáxias *star-forming* deste  $z \sim 2$  até hoje, cuja causa provavelmente está ligada ao consumo do gás das galáxias. Por outro lado, o *quenching* é um fenômeno muito mais abrupto, ocorrendo em uma escala de tempo pequena e assim dando origem à bimodalidade do diagrama cor-magnitude. Modelos de evolução galáctica tentam explicar esse fenômeno sugerindo mecanismos físicos que acabam com o gás frio, como mecanismos que esquentam o gás, inviabilizando o colapso gravitacional, ou mecanismos que ejetam o gás da galáxia.

### 1.2.2 Simulações

Diferentemente de outras áreas da Física, não é possível realizar experimentos para testar hipóteses e modelos em Astrofísica Extragaláctica. Toda a atividade empírica é limitada às observações feitas com telescópios. Sendo assim, simulações computacionais são extremamente úteis, e por isso são uma grande área de pesquisa na atualidade. Abaixo, descreve-se brevemente alguns resultados obtidos em simulações envolvendo galáxias compactas de alto *redshift*.

<sup>2</sup> 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)

Wellons et al. (2015) utilizou a simulação cosmológica Illustris para traçar galáxias compactas ao longo do tempo para determinar como suas formações são diferentes daquelas de galáxias de tamanho normal. Os autores encontraram dois mecanismos responsáveis pelo tamanho compacto para  $z \sim 2$ : formação estelar centralizada e formação prematura. No primeiro cenário, grandes influxos de gás trazem um surto intenso de formação estelar centralizada, geralmente como consequência de um *wet merger*, reduzindo o raio de meia-massa para menos de 2 kpc. O outro cenário considera que galáxias que formam suas estrelas rapidamente em alto *redshift* o fazem quando o Universo era muito denso, e por isso têm tamanhos menores ao longo de sua vida.

Wuyts et al. (2010) apresenta uma análise detalhada de simulações de galáxias remanescentes de *major mergers*, e as compara com observações de galáxias quiescentes e compactas em  $z \sim 2$ . Os autores encontram que *major mergers* são um mecanismo viável para produzir sistemas massivos ( $M \sim 10^{11} M_{\odot}$ ) e compactos ( $R_e \sim 1 \text{ kpc}$ ) desde que a fração de gás final seja da ordem de 40%. Além disso, os progenitores devem ser galáxias compactas *star-forming*, como esperado para alto *redshift*.

Usando simulações cosmológicas, Tacchella et al. (2016) analisa a relação entre estrutura e formação estelar em galáxias de alto *redshift* via a evolução de perfis de brilho superficial. Os autores encontram que, após um evento de compactação que ocorre quando a massa é  $M \sim 10^{9.5} M_{\odot}$  em  $z \sim 2 - 4$ , a densidade de gás atinge um pico dentro do raio efetivo, que está associado com um pico de formação estelar. Esse pico de formação estelar está associado com efeitos de *feedback* que promovem um *quenching* de dentro para fora. Os perfis de massa estelar e de formação estelar obtidos de observações mostram um formato parecido, consistente com o cenário simulado pelos autores.

Por fim, simulações de N-corpos foram realizadas por Oogi e Habe (2012) considerando *minor mergers* sequenciais com diferentes orientações, separando as componentes de matéria escura e estelar, e analisando as propriedades da galáxia restante. Utilizando razões de massa entre 1:10 e 1:20, os autores mostram que *minor mergers* sequenciais são muito eficientes em aumentar o tamanho de galáxias e em diminuir a dispersão de velocidades das estrelas<sup>3</sup>, resultados que estão de acordo com observações.

### 1.3 Motivação e Objetivo

Observações em alto *redshift* ( $z \geq 1$ ) revelam que uma população de galáxias massivas e quiescentes (chamadas *red nuggets*) já existia há cerca de 10 bilhões de anos. Ao compararmos esses objetos com galáxias quiescentes massivas do universo local, sendo estas suas prováveis descendentes, vemos que eles são muito compactos, o que sugere que passam

<sup>3</sup> Dentro de um raio efetivo. *Minor mergers* afetam as regiões externas da galáxias, e assim aumentam o raio efetivo, que passa a englobar regiões com dispersão de velocidades menor. A dispersão central permanece estável.

por uma forte mudança em seu tamanho ao longo do tempo (BUITRAGO et al., 2008). Simulações sugerem que esta evolução no tamanho seja devida a, principalmente, fusões (*mergers*) com outras galáxias, porém outros processos físicos podem estar envolvidos também (NEWMAN et al., 2012).

Porém, já que elas são tão compactas e distantes, os telescópios atuais não conseguem resolver seus raios efetivos para estudar as propriedades de suas populações estelares, sua dinâmica e cinemáticas. Já que *mergers* ocorrem de forma estocástica, espera-se que exista uma população de galáxias no Universo local que não sofreram esses processos desde que se tornaram quiescentes. Essas galáxias são chamadas de galáxias relíquias e devem ter a mesma morfologia e cinemática que as *red nuggets*, sendo seu estudo uma alternativa para contornar o problema de resolução.

O objetivo do trabalho é caracterizar a cinemática e as propriedades das populações estelares de uma amostra de galáxias compactas massivas no Universo local a fim de verificar se são condizentes com o esperado de galáxias relíquias. O trabalho focará nos seguintes itens:

- Verificar quais galáxias têm propriedades condizentes com o esperado de galáxias relíquias;
- Investigar cenários de formação e evolução desses objetos, bem como sua relação com galáxias elípticas massivas locais;
- Nos casos das galáxias que forem confirmadas como relíquias, compreender a importância desses objetos na formação e evolução de galáxias massivas.



## 2 Metodologia

Nesta seção serão apresentados os métodos utilizados para a realização do trabalho. Primeiro, será discorrido sobre a seleção das amostras de galáxias utilizadas, em particular a origem dos dados e os critérios impostos para selecionar os objetos. Em seguida, será apresentado o método de obtenção dos dados cinemáticos das galáxias. Por fim, discute-se os procedimentos analíticos aplicados às medidas para realizar a análise desejada.

### 2.1 Seleção das amostras

Para a realização do trabalho, foram construídas duas amostras: uma amostra de galáxias massivas compactas do Universo local e uma amostra de controle, que contém galáxias locais de tamanho normal, a fim de compará-las com as compactas. Para os dois casos, utilizou-se dados públicos do projeto *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), para o qual se tem medidas de várias propriedades das galáxias, como massa (CHANG et al., 2015), tamanho (SIMARD et al., 2011), entre outros. Deste projeto, utilizou-se dados públicos do *survey* MaNGA: *Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory*. Esse *survey* foi escolhido por possuir dados de espectroscopia de campo integral (IFU), que fornece um "cubo de dados" para cada galáxia. Isso significa que cada imagem possui duas dimensões espaciais e uma dimensão espectral, de modo que cada pixel da imagem possui seu próprio espectro, permitindo a construção de mapas cinemáticos para as galáxias. Além disso, o MaNGA contempla um número maior de objetos quando comparado com outros *surveys* com IFU (e.g. CALIFA, SAMI e Atlas3D), deste modo permitindo que fosse construída uma amostra maior para a realização do trabalho, o que é essencial visto que galáxias compactas são objetos raros. A Figura 6 mostra um exemplo de galáxia pertencente à amostra, com o campo abrangido pelo MaNGA indicado em cor magenta.

#### 2.1.1 Amostra de galáxias massivas compactas

Essa amostra consiste em 87 objetos do Universo local, que foram escolhidos de modo que fossem massivos e compactos. Para isso, utilizou-se os seguintes critérios:

- A massa estelar está no intervalo  $10^{10.5} M_{\odot} < M < 10^{11.5} M_{\odot}$ ;
- O tamanho do semi-eixo maior da elipse de meia luz está pelo menos  $1\sigma$  abaixo do tamanho mediano para galáxias *early-type* com a mesma massa (abaixo da linha vermelha inferior da Figura 7).

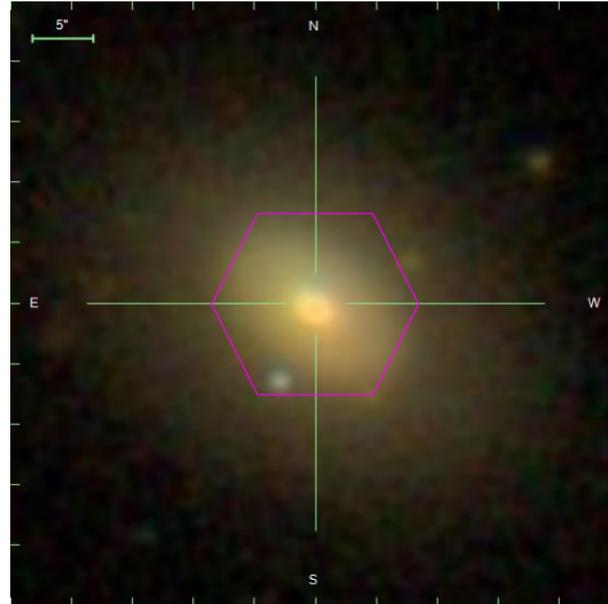


Figura 6 – Imagem de uma galáxia da amostra observada pelo SDSS. O hexágono em magenta representa o campo observado pelo MaNGA. Fonte: [Cherinka et al. \(2019\)](#).

### 2.1.2 Amostra de controle

A amostra de controle contém 174 objetos de tamanho normal, isto é, dentro de  $1\sigma$  do tamanho mediano para uma dada massa (entre as linhas vermelhas da [Figura 7](#)). Os objetos das duas amostras foram pareados por:

- **Taxa de formação estelar específica:** esse parâmetro foi utilizado para garantir que a amostra de controle fosse quiescente;
- $\sigma_e$ : definido como a dispersão de velocidades medida em uma abertura de um raio efetivo  $R_e$ , onde este é definido como o semieixo maior da elipse que contém metade da luz da galáxia. Esse parâmetro foi escolhido pois a dispersão de velocidades não apresenta evolução significativa com *redshift* ([BEZANSON et al., 2011](#)) e está correlacionada com a época de formação da galáxia ([THOMAS et al., 2010](#)). Assim, pode-se comparar objetos formados em uma época semelhante, mas com uma evolução não necessariamente igual.

## 2.2 Medidas de cinemática

Os mapas cinemáticos foram obtidos usando o código *Penalized Pixel Fitting* (pPXF), desenvolvido por [Cappellari \(2017\)](#). O código utiliza uma biblioteca de espectros estelares (podendo estes ser sintéticos ou observados), com os quais faz uma combinação linear para gerar o espectro que melhor se ajusta às medidas ([Figura 8](#)). O resultado dessa

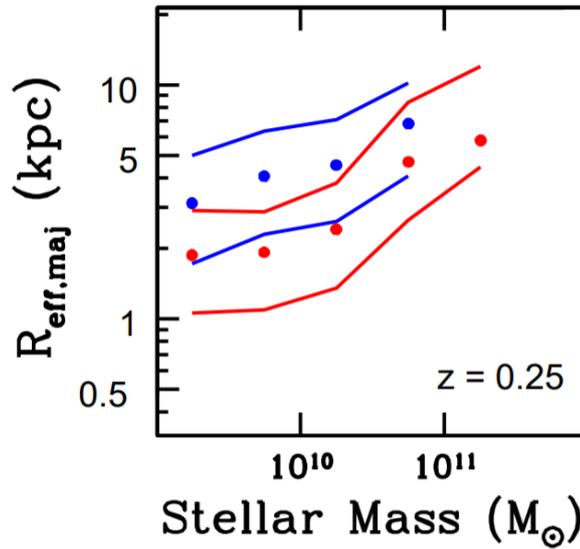


Figura 7 – Relação tamanho-massa estelar para galáxias *early-type* (em vermelho) e *late-type* (em azul). Os pontos representam a mediana da distribuição e as linhas representam um desvio padrão. Fonte: (VAN DER WEL et al., 2014)

combinação é então convoluído com um **polinômio de Gauss-Hermite** (ver apêndice A).

A partir desse ajuste, obtêm-se os parâmetros cinemáticos: velocidade ( $V$ ), dispersão de velocidades ( $\sigma$ ) e os parâmetros de Gauss-Hermite  $h_3$  e  $h_4$ . Esse processo é realizado para cada pixel da imagem. A biblioteca de espectros utilizada foi a biblioteca eMILES (VAZDEKIS et al., 2010), que consiste em distribuições espectrais de energia (SEDs) sintéticas de populações estelares simples (SSPs), abrangendo toda a faixa espectral visível com resolução relativamente alta ( $\text{FWHM} = 2.3\text{\AA}$ ).

Uma vez obtidos os mapas cinemáticos, buscou-se obter o perfil radial da velocidade na direção de máxima rotação, isto é, na direção perpendicular ao eixo de rotação da galáxia. Essa direção foi obtida usando o procedimento `find_galaxy`, pertencente ao código *Multi-Gaussian Expansion*, desenvolvido por Cappellari (2002). Esse procedimento analisa a distribuição da intensidade de luz da imagem para encontrar o ângulo de posição fotométrico da galáxia, que se verificou ser, na maioria dos casos, coincidente com o eixo de rotação. Nos casos em que não houve essa correspondência, a direção do eixo de rotação foi inserida manualmente.

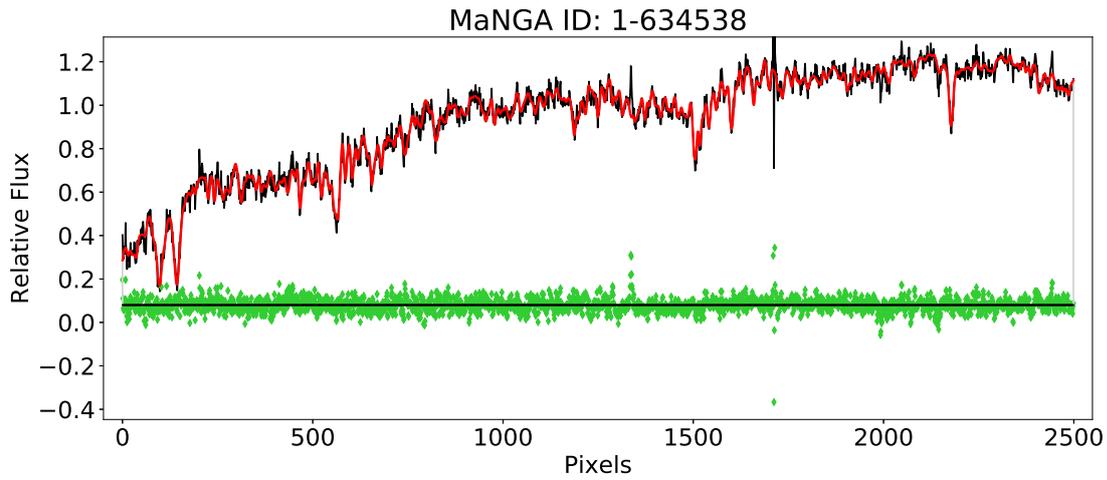


Figura 8 – Ajuste feito pelo pPXF para um espectro arbitrário. A linha preta é o espectro observado, a linha vermelha é o ajuste e os pontos verdes são os resíduos do ajuste.

## 2.3 Análise de dados

Para medir parâmetros das curvas de rotação, procurou-se descrevê-las usando um modelo analítico. Utilizou-se o modelo de disco exponencial (FREEMAN, 1970), dado por

$$(v(r) - v_{\text{off}})^2 = \frac{(r - r_{\text{off}})^2 \pi G \mu_0}{h} (I_0 K_0 - I_1 K_1), \quad (2.1)$$

onde  $v_{\text{off}}$  e  $r_{\text{off}}$  são a velocidade em  $r = 0$  e a distância a partir do centro onde  $v = 0$ , respectivamente,  $G$  é a constante gravitacional,  $\mu_0$  é o pico de densidade superficial de massa,  $h$  é o raio de escala e  $I_n K_n$  são funções de Bessel modificadas, calculadas em  $0.5r/h$  (Figura 9). Alguns objetos não apresentam um padrão de rotação em seus campos de velocidade, por isso o modelo de disco exponencial não pôde ser ajustado para todas as galáxias: uma galáxia da amostra compacta e 35 galáxias da amostra de controle não puderam ser ajustadas.

Usando as curvas de rotação, pôde-se quantificar o suporte rotacional da galáxia, definido como  $V_{\text{max}}/\sigma_0$ , onde  $V_{\text{max}}$  é o valor máximo de velocidade, em módulo, atingido no modelo da equação 2.1 (somente considerou-se a região abrangida pelo campo do MaNGA) e  $\sigma_0$  é a dispersão de velocidades medida no pixel central da galáxia. Para as galáxias em que o modelo não pôde ser ajustado,  $V_{\text{max}}$  foi tido como a mediana dos 5 maiores valores, em módulo, da curva de rotação.

Além disso, buscou-se analisar se os objetos da amostra de galáxias compactas apresentam uma anticorrelação entre os mapas de  $V/\sigma$  e  $h_3$ . Para isso, calculou-se o **coeficiente de correlação  $\tau$  de Kendall**, um parâmetro que quantifica a correlação de dois parâmetros de uma amostra de  $n$  pontos, e é definido por (NELSEN, 2011)

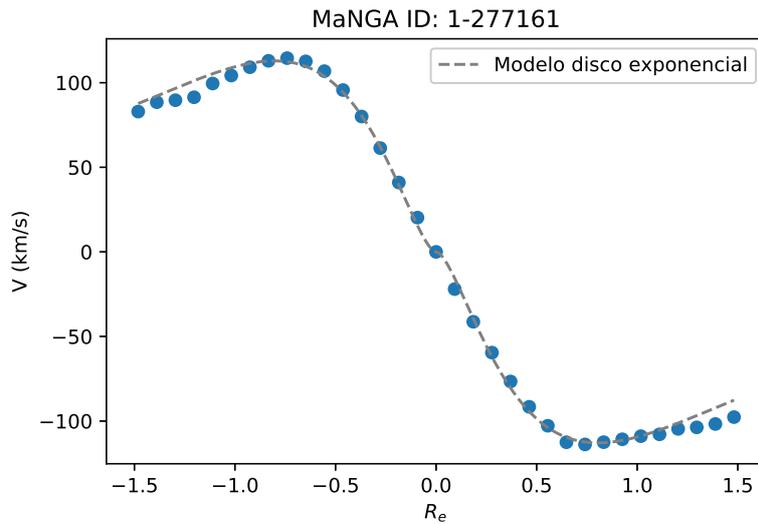


Figura 9 – Exemplo de curva de rotação com ajuste do modelo de disco exponencial.

$$\tau = \frac{(\text{número de pares concordantes}) - (\text{número de pares discordantes})}{n(n-1)/2}, \quad (2.2)$$

onde um par de medidas  $(x_i, y_i)$  e  $(x_j, y_j)$  é dito concordante se a reta que contém os dois pontos é crescente, e discordante se a reta é decrescente. Se  $x_i = x_j$  ou  $y_i = y_j$  o par não é concordante nem discordante. O denominador é o número total de pares, então temos que  $-1 < \tau < 1$ , onde  $\tau = 1$  representa uma correlação perfeita e  $\tau = -1$  uma anticorrelação perfeita.



## 3 Resultados e Discussão

Nesta seção, serão apresentados os resultados referentes ao estudo das galáxias das amostras introduzidas na Seção 2.1. Primeiro, será mostrado uma comparação do suporte rotacional das amostras, bem como a análise desse parâmetro para subamostras da amostra de galáxias compactas. Em seguida, será verificado como os mapas de  $V/\sigma$  e  $h_3$  da amostra compacta estão correlacionados, em particular se há anticorrelação entre esses parâmetros, como esperado para galáxias que não sofreram nenhum *major mergers* pobre em gás (fração de gás menor que 20%), nem um número significativo de *dry minor mergers*. Finalmente, serão discutidos os resultados obtidos e suas implicações para o estudo de evolução de galáxias.

Dois exemplos de mapas cinemáticos gerados pelo pPXF são mostrados nas Figuras 10 e 11, um para uma galáxias da amostra de controle (Figura 10) e outro para uma galáxia massiva compacta (Figura 11). Nota-se que, para esse caso, a galáxia compacta apresenta forte rotação,  $\sigma$  concentrado em uma pequena região central e possui anticorrelação entre  $V$  e  $h_3$ . A galáxia de controle apresenta rotação fraca,  $\sigma$  alto em todo o campo e não possui tal anticorrelação. Além disso, é válido mencionar que o parâmetro  $h_4$  foi medido mas não foi utilizado para nenhuma análise nesse trabalho.

### 3.1 Suporte rotacional

O suporte rotacional ( $V_{\text{max}}/\sigma_0$ ) é um parâmetro que quantifica a razão entre movimentos ordenados ( $V_{\text{max}}$ ) e movimentos aleatórios ( $\sigma_0$ ). Dizemos que uma galáxia é suportada por rotação se o suporte rotacional é alto, e por dispersão se este é baixo. O fenômeno de *mergers* tende a diminuir esse parâmetro: *minor mergers* aumentam  $\sigma$  em regiões mais externas da galáxia e diminuem  $V_{\text{max}}$  (BOURNAUD; JOG; COMBES, 2007), enquanto que *major mergers* destroem o disco de rotação, por isso aumentam  $\sigma$  e diminuem muito  $V_{\text{max}}$ . Entretanto, para os dois casos  $\sigma_0$  permanece estável (BEZANSON et al., 2011). Portanto, os dois tipos de *mergers* afetam o suporte rotacional, porém é preciso um número grande de *minor mergers* (por exemplo,  $\geq 3$  para uma razão de massa 1:5 (BOURNAUD; JOG; COMBES, 2007)), para fazerem uma diferença significativa.

A Figura 12 e a Figura 13 mostram o suporte rotacional para as duas amostras em função da massa estelar e da dispersão de velocidades central. As barras de erro foram estimadas usando o método de reamostragem *jackknife* (EFRON; STEIN, 1981). Verifica-se que o suporte rotacional não varia significativamente com a massa, e no caso de  $\sigma_0$  nota-se um decréscimo do suporte rotacional entre  $150 < \sigma_0 < 200$  km/s, sendo que para  $\sigma_0 > 200$  o suporte rotacional não varia consideravelmente. O resultado mais interessante,

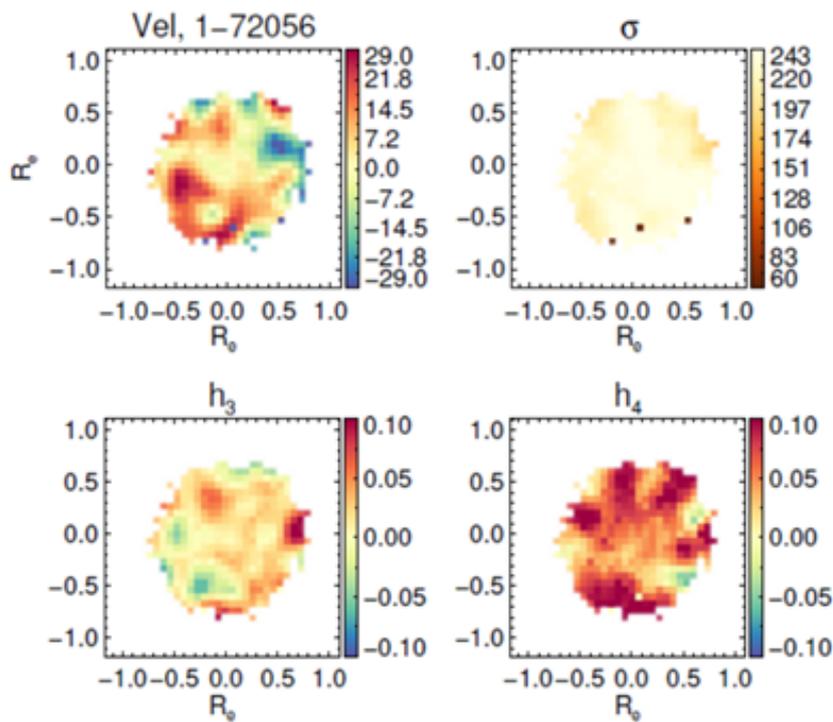


Figura 10 – Mapas de velocidade, dispersão de velocidades,  $h_3$  e  $h_4$  obtidos após rodar o pPXF para uma galáxia de controle. Esta galáxia de controle apresenta pouca rotação, alta dispersão de velocidades em todo o campo e nenhuma correlação entre a velocidade e  $h_3$ .

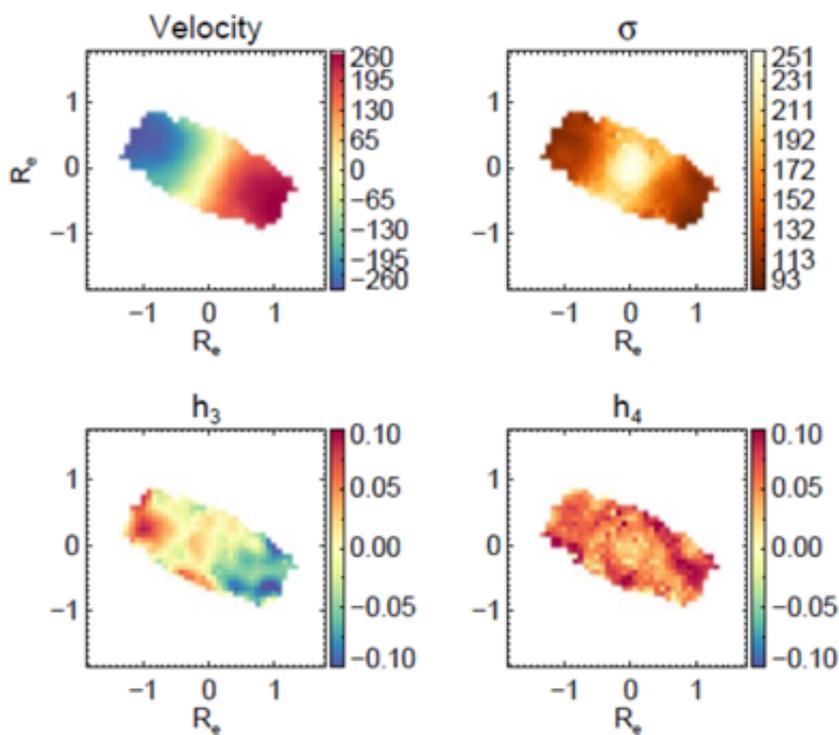


Figura 11 – Mapas cinemáticos para uma galáxia quiescente compacta. Esta galáxia apresenta alta rotação, dispersão de velocidades concentrada e possui anticorrelação entre  $V$  e  $h_3$ .

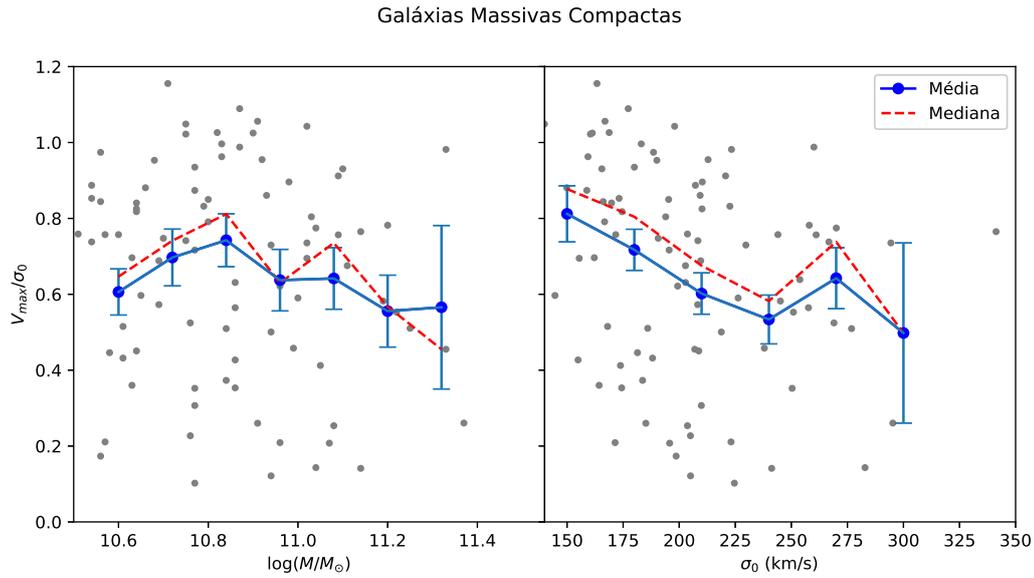


Figura 12 – Suporte rotacional ( $V_{\max}/\sigma_0$ ) em função da massa e da dispersão de velocidades central para a amostra de galáxias compactas.

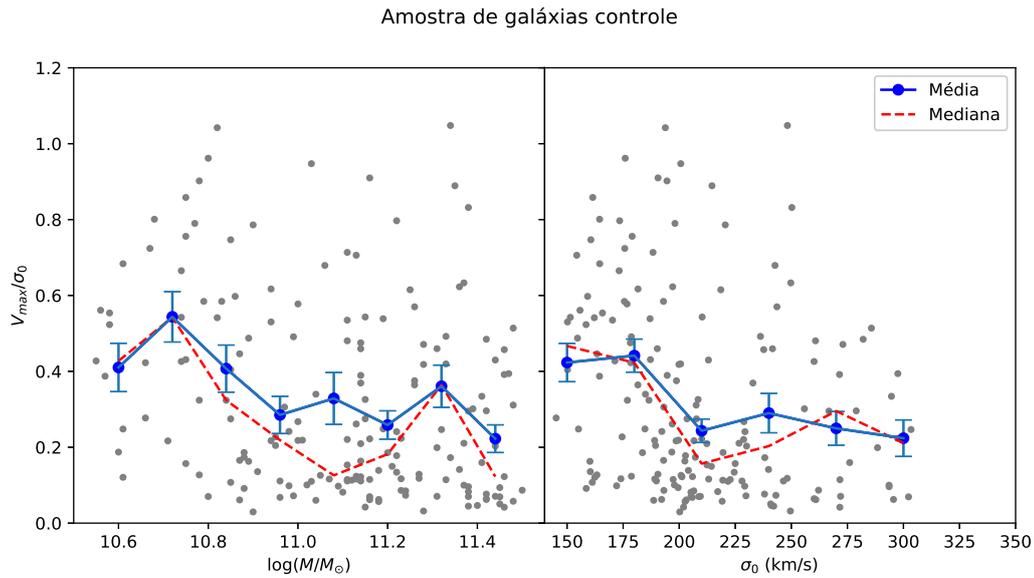


Figura 13 – Suporte rotacional ( $V_{\max}/\sigma_0$ ) em função da massa e da dispersão de velocidades central para a amostra de galáxias compactas.

porém, é quando se compara o suporte rotacional das duas amostras: esse parâmetro é consideravelmente maior para a amostra de galáxias compactas. Inspecionando o gráfico, essa diferença parece ser devida a uma grande fração de galáxias com baixo  $V_{\max}/\sigma_0$  na amostra de controle, o que não aparece de forma significativa na amostra de galáxias compactas.

É conhecido que galáxias lenticulares tendem a possuir maior suporte rotacional que galáxias elípticas (EMSELLEM et al., 2011), pois galáxias lenticulares possuem, em geral,

um contribuição significativa do disco em termos de massa. Logo, como as amostras não foram pareadas por morfologia, uma maior proporção de galáxias lenticulares na amostra de galáxias massivas compactas pode explicar o maior suporte rotacional comparado à amostra de controle. A fim de verificar essa possibilidade, dividiu-se ambas as amostras em galáxias lenticulares e elípticas. Utilizou-se a classificação morfológica de [Huertas-Company et al. \(2011\)](#), cujo trabalho consistiu em utilizar um algoritmo de *machine learning* para determinar o tipo morfológico de galáxias do SDSS, obtendo assim a probabilidade dos objetos serem galáxias elípticas ou de conterem disco. Pode-se então definir subamostras contendo apenas objetos com maior probabilidade de terem determinada morfologia. A [Figura 15](#) e a [Figura 16](#) mostram comparações do suporte rotacional para subamostras com maior probabilidade de serem elípticas e de serem galáxias S0 (i.e., contendo disco), respectivamente. Observa-se que, para ambas as subamostras, o resultado se mantém: o suporte rotacional é maior na amostra de galáxias compactas.

Por fim, pode-se comparar esse resultado com outros já obtidos na literatura, referentes a uma amostra de galáxias em outro *redshift*. Recentemente, [Bezanson et al. \(2018\)](#) investigou a evolução do suporte rotacional de galáxias passivas nos últimos 7 bilhões de anos, por meio da comparação do suporte rotacional de galáxias passivas com *redshift* entre  $0.6 < z < 1.0$  à galáxias locais. Os autores encontraram que o suporte rotacional era, em média,  $94 \pm 22\%$  maior há 7 bilhões de anos. A fim de verificar a hipótese de que os objetos da amostra são galáxias relíquia, comparou-se o suporte rotacional das galáxias massivas compactas ao suporte rotacional das galáxias passivas da amostra de [Bezanson et al. \(2018\)](#).

Usando os dados desse trabalho, que foram disponibilizados pelos autores, pôde-se analisar o suporte rotacional dessas galáxias ([Figura 14](#)). Novamente, esse parâmetro é consideravelmente maior para as galáxias compactas do que para aquelas em  $z \sim 0.8$ , que por sua vez têm suporte rotacional levemente maior do que a amostra de controle. A diferença é devido principalmente a um número significativo de galáxias passivas com suporte rotacional próximo de zero, que estão ausentes da amostra de galáxias massivas compactas.

## 3.2 Comparação entre $h_3$ e $V/\sigma$

Simulações realizadas por [Hoffman et al. \(2009\)](#) apontam que galáxias formadas em *major mergers* ricos em gás apresentam uma forte anticorrelação entre os mapas de  $h_3$  e  $V/\sigma$ , e que *mergers* adicionais destroem essa anticorrelação. Assim, a presença desta indica um histórico com poucos *mergers*, e é uma condição necessária para uma galáxia ser relíquia. A [Figura 17](#) mostra dois gráficos de  $h_3$  em função de  $V/\sigma$  para duas galáxias representativas da amostra de compactas. A galáxia 1-277161 apresenta forte anticorrelação

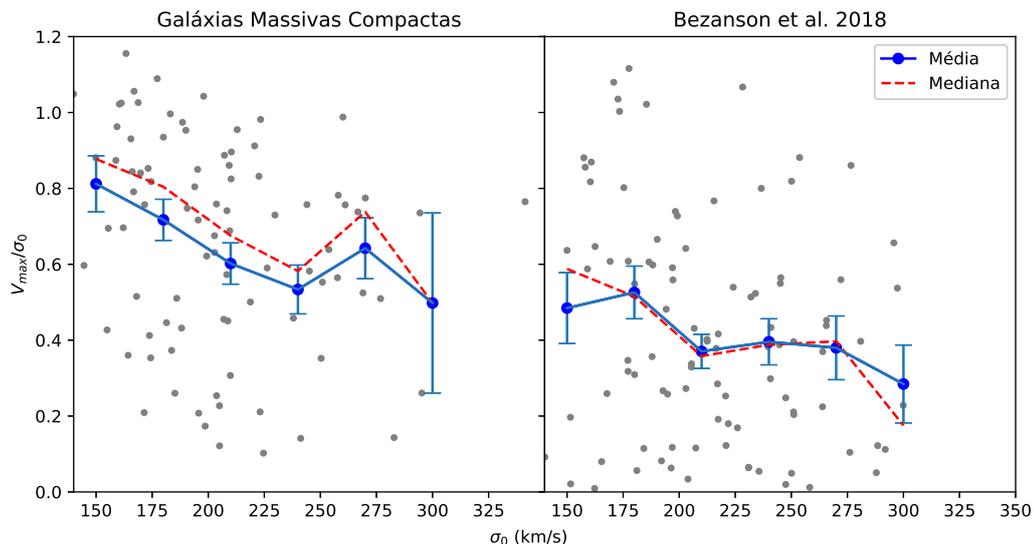


Figura 14 – Suporte rotacional em função de  $\sigma_0$  para a amostra de galáxias compactas e para a amostra de galáxias em  $z \sim 0.8$  analisadas por [Bezanson et al. \(2018\)](#).

entre os dois parâmetros, enquanto que a galáxia 1-378428 não apresenta anticorrelação.

O parâmetro  $\tau$ , introduzido na Seção 2.3, foi utilizado para quantificar a anticorrelação, de modo que se verificou que, para a amostra de compactas, o valor médio e o desvio padrão de  $\tau$  valem, respectivamente,

$$\bar{\tau} = -0.48 \quad e \quad \sigma_{\tau} = 0.19. \quad (3.1)$$

Portanto, considerou-se que  $h_3$  e  $V/\sigma$  são anticorrelacionados se  $\tau < -0.3$ . Para a amostra de compactas, 73 ( $\sim 84\%$ ) objetos satisfazem esse critério, enquanto que para a amostra de controle esse número é 60 ( $\sim 34\%$ ). A [Figura 18](#) mostra, novamente, o suporte rotacional em função da dispersão de velocidades central para subamostras das galáxias compactas e de controle, agora selecionadas com o critério  $\tau < -0.3$ . Novamente, o resultado obtido na seção anterior se mantém, mostrando um maior suporte rotacional para as galáxias compactas.

### 3.3 Discussão

No Universo local, galáxias compactas apresentam, em média, um suporte rotacional maior do que aquelas com tamanho normal ([Figura 12](#) e [Figura 13](#)). Esse resultado é mantido quando os objetos das amostras são segregados por morfologia ([Figura 15](#) e [Figura 16](#)) indicando que este não é devido a um viés morfológico presente na amostra de galáxias compactas. Além disso, verificou-se que esses objetos também possuem, em média, suporte rotacional maior do que aqueles em  $z \sim 0.8$  ([Figura 14](#)). Além disso,

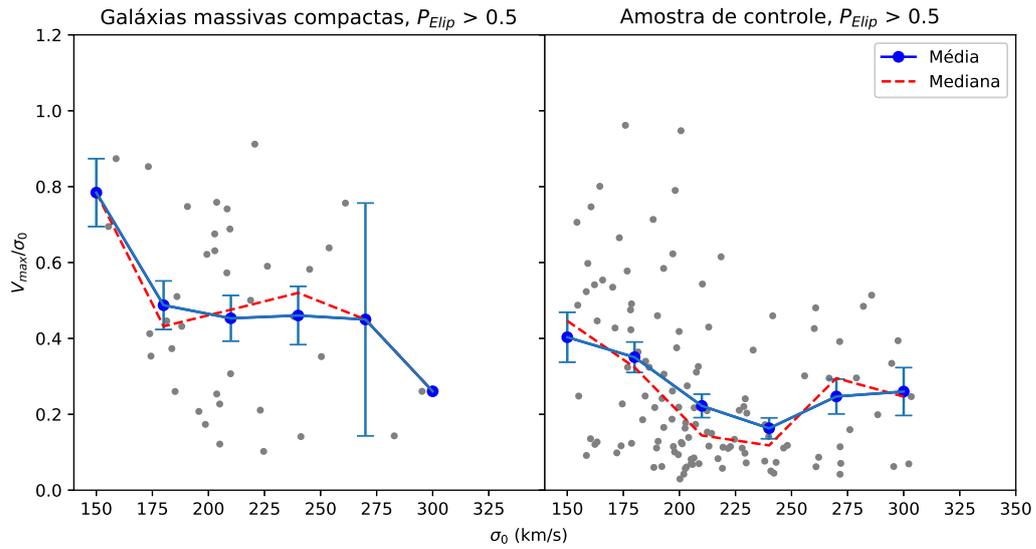


Figura 15 – Suporte rotacional em função da dispersão de velocidades central para galáxias com probabilidade maior que 50% de serem elípticas.

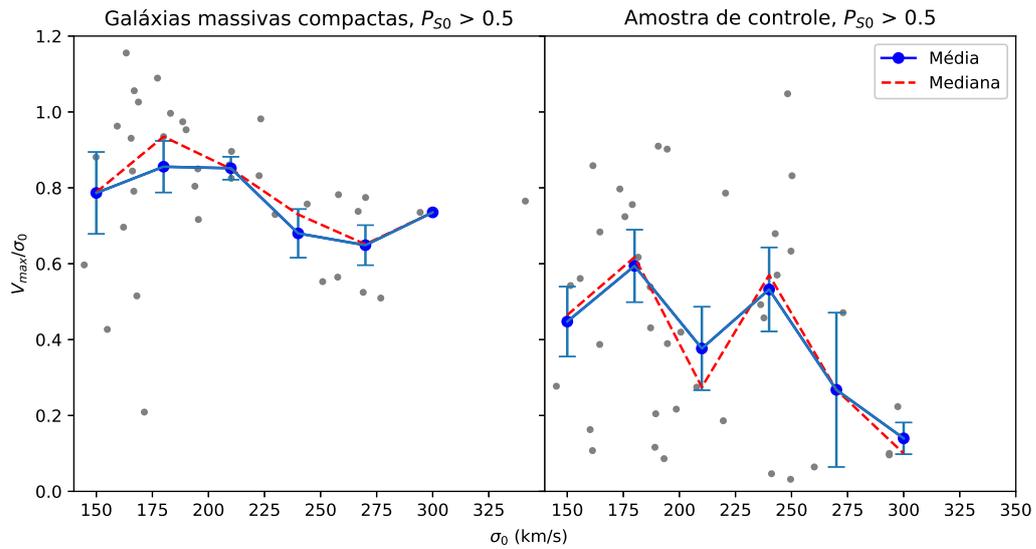


Figura 16 – Suporte rotacional em função da dispersão de velocidades central para galáxias com probabilidade maior que 50% de serem tipo S0.

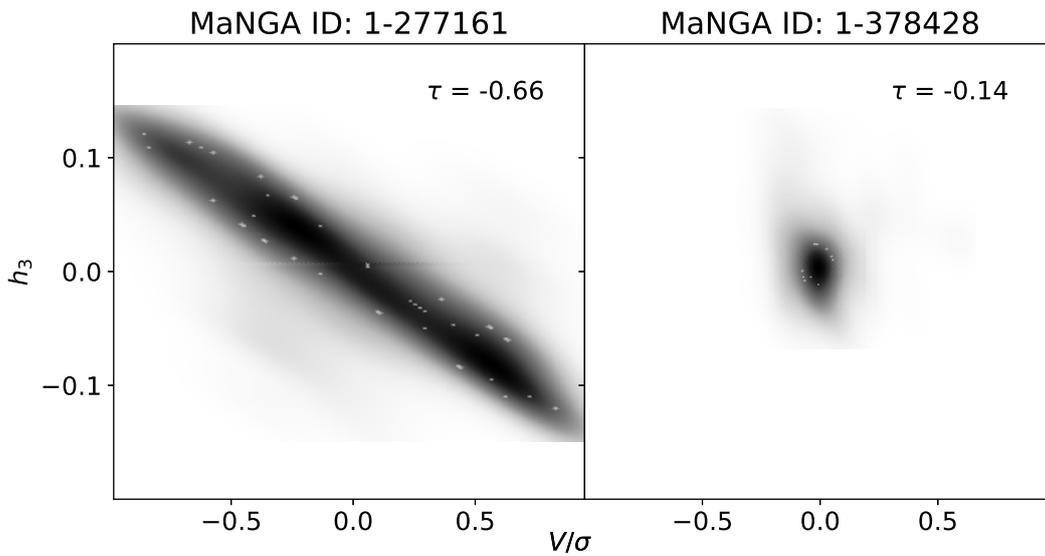


Figura 17 – Relação entre o suporte rotacional e  $h_3$  para duas galáxias representativas dos demais objetos da amostra. o sombreado representa densidade de pontos. A galáxia 1-277161 mostra uma forte anticorrelação entre  $h_3$  e  $V/\sigma$ , o que sugere que foi formada em um major merger rico em gás. Já a galáxia 1-378428 não apresenta tal correlação, o que sugere que esse objeto passou por um major merger pobre em gás.

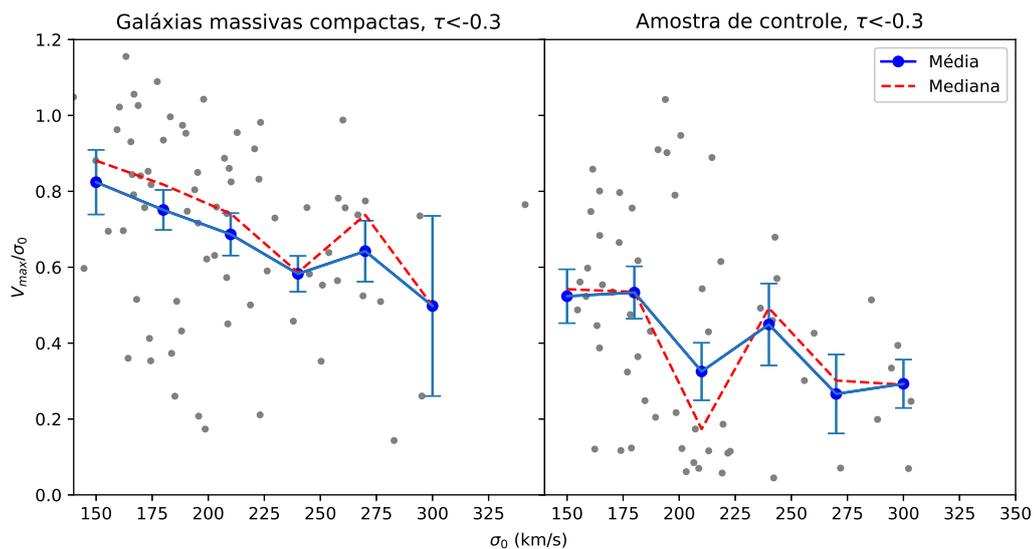


Figura 18 – Suporte rotacional em função da dispersão de velocidades para galáxias com  $\tau < -0.3$ , isto é, com anticorrelação entre  $h_3$  e  $V/\sigma$ .

aproximadamente 80% da amostra de galáxias compactas apresentou anticorrelação entre  $h_3$  e  $V/\sigma$ . O próximo passo para avaliar a possibilidade de galáxias da amostra serem relíquias é comparar suas propriedades cinemáticas, em especial o suporte rotacional, ao esperado para *red nuggets*.

O trabalho de Wuyts et al. (2010) estuda parâmetros como tamanho e cinemática de galáxias massivas compactas em *redshift*  $z \sim 2$  por meio de simulações de *mergers* entre galáxias ricas em gás. Os autores utilizaram o método *smoothed-particle hydrodynamics* (SPH) para simular *mergers* de galáxias em *redshift*  $z \sim 0-3$  com massas da ordem de  $10^9 - 10^{11}$  massas solares e com fração de gás entre 20%-80%. Eles encontram que sistemas com massa  $\sim 10^{11}M_{\odot}$  e com raio de meia massa da ordem de 1 kpc, características típicas de galáxias quiescentes compactas em  $z \sim 1 - 2$ , podem ser formados quando a fração de gás após o *merger* é cerca de 40%, sendo o tamanho do raio de meia massa função da fração de gás. Além disso, a dispersão de velocidades típica desses objetos simulados foi da ordem de 300-400 km/s e apresentaram considerável suporte rotacional, com  $V/\sigma$  chegando a 1. Analisando a Figura 12, observa-se que existem objetos da amostra com suporte rotacional dessa magnitude, apesar de não serem tão compactos, com raios efetivos da ordem de 3 kpc para galáxias com  $10^{11}$  massas solares. As simulações mostram que, para formar objetos com esses parâmetros, é necessária uma fração de gás menor, em torno de 20%. Isso sugere uma possível origem em *mergers* ricos em gás para esses objetos.

*Red nuggets* são difíceis de observar diretamente devido ao seu tamanho compacto e a necessidade de longos tempos de integração para atingir uma razão sinal-ruído suficiente no contínuo ( $\sim 4-9$  horas para cada galáxia usando o telescópio de 10 metros Keck (BELLI; NEWMAN; ELLIS, 2017)). Para contornar esse problema, Newman et al. (2018) utilizou observações de 4 galáxias quiescentes em  $z \sim 1,95-2,64$  distorcidas por lentes gravitacionais. Deste modo, a imagem é magnificada e passa a ser espacialmente resolvível, o que torna viável resolver a cinemática dessas galáxias. Os parâmetros encontrados para esse objeto são alta rotação ( $V_{\max} = 290-352$  km/s), alta elipticidade ( $e \sim 0.75-0.85$ ) e alto suporte rotacional calculado em um raio efetivo ( $(V/\sigma)_{R_e} = 1,7-2,3$ ). Os autores concluem que, embora o suporte rotacional diminua com o fim da formação estelar, para atingir valores baixos como aqueles medidos no Universo local é necessária uma série de *mergers*. O valor médio de  $V_{\max}/\sigma_0$  das galáxias estudadas por Newman é  $V_{\max}/\sigma_0 = 0.87$ , estando próximo do valor de muitas das galáxias da amostra de compactas (Figura 12).

Yildirim et al. (2017) analisou uma amostra de 16 galáxias elípticas compactas (CEGs) do universo local por meio de observações do telescópio Hubble (HST) e de dados de IFU obtidos com o telescópio de Calar Alto. Os objetos são compactos ( $R_e \leq 4$  kpc), têm alta elipticidade ( $0.43 \leq b/a \leq 0.73$ ), alta rotação ( $78 \leq V \leq 280$  km/s) e alta dispersão de velocidades central ( $107 \leq \sigma_0 \leq 380$  km/s). Esses objetos foram verificados como *outliers* na relação massa-tamanho local, mas estão de acordo com esta relação

para  $z \sim 2$ . Além disso, Os autores verificaram que as populações estelares (resolvidas espacialmente) de 14 desses objetos são uniformemente velhas ( $\geq 10$  Gyr), e também que as essas galáxias apresentam anticorrelação entre  $V$  e  $h_3$ . Tudo isso os levou a concluir que estes objetos são red nuggets não evoluídas, isto é, galáxias relíquias. Os parâmetros cinemáticos encontrados estão de acordo com aqueles obtidos nas simulações de [Wuyts et al. \(2010\)](#) para a formação de galáxias de alto redshift, sugerindo que essas CEGs podem ter sido formadas por *major mergers* ricos em gás. Novamente, os objetos de nossa amostra não são tão compactos quanto as galáxias estudadas por Yildirim et al., porém, em termos de cinemática são semelhantes: encontrou-se uma distribuição similar de suporte rotacional, além de semelhanças nos mapas de velocidade e dispersão de velocidades. São elas: os mapas de velocidade das duas amostras apresentam um claro padrão de rotação, enquanto que os mapas de dispersão são concentrados na região central, sofrendo uma queda repentina em raios maiores ([Figura 11](#)). Portanto, os objetos de nossa amostra provavelmente são objetos de mesma natureza que os de Yildirim et al.

Tanto Newman et al. quanto Yildirim et al. estudaram as propriedades cinemáticas de galáxias massivas compactas de alto *redshift*, e as os resultados encontradas pelos autores condizem com os encontrados para as galáxias de nossa amostra. O suporte rotacional encontrado por Newman et al. está de acordo com o encontrado na [Figura 12](#), e os mapas obtidos por Yildirim et al. são semelhantes aos da [Figura 11](#). Assim, como encontrado por Yildirim et al., espera-se que haja anticorrelação entre  $V/\sigma$  e  $h_3$  para nossos objetos serem galáxias relíquias.

[Hoffman et al. \(2009\)](#) realizou simulações de *major mergers* com massa 1:1 para analisar a dependência dos parâmetros  $h_3$  e  $h_4$  com o suporte rotacional para diferentes conteúdo de gás das galáxias interagentes. Um resultado obtido pelos autores é que existe uma forte anticorrelação entre  $h_3$  e  $V/\sigma$  quando a fração de gás é  $f_{gás} \geq 20\%$ . Além disso, simulando *mergers* subsequentes, os autores mostraram que a anticorrelação é praticamente destruída, e o espalhamento no plano  $h_3$ - $V/\sigma$  torna-se consideravelmente menor. O fato de aproximadamente 80% da amostra deste trabalho apresentar a anticorrelação, como mostrado na [Figura 17](#), sugere que essas galáxias podem, mas não necessariamente, ter sido formadas em *major mergers* ricos em gás, e que não passaram por *major mergers* pobres em gás desde sua formação.

Para entender o efeito de *minor mergers* nas propriedades de galáxias, [Bournaud, Jog e Combes \(2007\)](#) realizou simulações de N-corpos de galáxias sofrendo *mergers* subsequentes. Os autores utilizaram diferentes razões de massa, desde 4:1 até 50:1, e analisaram as propriedades morfológicas e cinemáticas das galáxias restantes, concluindo que esses processos levam à formação de galáxias elípticas similares a galáxias reais. Além disso, Bournaud mostra a evolução de  $V/\sigma$  ao longo de sucessivos *minor mergers* para diferentes razões de massa, indo de um valor inicial fixo  $V/\sigma \sim 1.2$  até  $V/\sigma \sim 0.2$ , quando

a massa acretada é o dobro da massa inicial. Tem-se que, para  $V/\sigma \sim 0.8 - 0.6$ , a massa acretada é da ordem de  $1.3 - 1.5$  vezes a massa inicial, por exemplo após um *merger* 3:1, ou 4 *mergers* 10:1, e assim por diante. Sendo assim, como grande parte dos objetos de nossa amostra apresentam suporte rotacional dessa ordem, conclui-se que eles tenham sofrido poucos *minor mergers* em sua história. Já na amostra controle, há objetos com  $V/\sigma \sim 0.2$ , sugerindo que esses objetos passaram por *mergers* suficientes para dobrar sua massa.

As diferentes comparações entre as galáxias compactas deste trabalho e aquelas analisadas na literatura, tanto as produzidas por simulações quanto as observadas diretamente, mostram que esses objetos são muito semelhantes. Apesar de não serem tão compactos quanto os objetos comumente estudados na literatura, eles possuem considerável suporte rotacional ( $0.10 \leq V_{\max}/\sigma_0 \leq 1.15$ ) e apresentam anticorrelação entre  $h_3$  e  $V/\sigma$ . Essas semelhanças sugerem que os resultados obtidos no trabalho estão de acordo com um cenário em que as galáxias compactas são objetos que passaram por poucos *mergers* em sua história, de modo a preservar o movimento ordenado de rotação da galáxia, o seu tamanho compacto e a anticorrelação característica de galáxias passivas de  $z \sim 1 - 2$ .

Desse modo, as galáxias compactas estudadas mostram ser boas candidatas a galáxias relíquias. Entretanto, para confirmar se elas realmente o são, deve-se realizar mais estudos sobre essa amostra, em particular sobre as populações estelares que constituem as galáxias. Além disso, estudos abrangendo regiões mais externas das galáxias são necessários, visto que é sabido que *minor mergers* tendem a afetar as populações estelares das regiões periféricas das galáxias. Feitos tais pesquisas, pode-se confirmar quais delas são relíquias, e assim obter uma amostra de galáxias análogas àquelas de alto *redshift* que podem ser estudadas de modo a progredir o conhecimento sobre evolução e formação de galáxias.

## 4 Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste trabalho foi feita um estudo de uma amostra de 87 galáxias quiescentes, massivas e compactas do Universo local a fim de analisar suas propriedades cinemáticas e verificar se estas são semelhantes àsquelas de galáxias em alto *redshift*. Para isso, a amostra foi comparada com uma amostra de controle, que consistiu em 174 galáxias locais de tamanho normal pareadas por dispersão de velocidades e por taxa de formação estelar. A análise consistiu em comparar o suporte rotacional, definido como  $V_{max}/\sigma_0$  (ver Seção 2.3), entre as duas amostras. Essa comparação foi realizada também entre subamostras considerando a provável morfologia das galáxias.

Além disso, foi investigado a relação existente entre o terceiro momento de Gauss-Hermite  $h_3$  e  $V/\sigma$ . Resultados estabelecidos na literatura mostram que o fato desses parâmetros estarem anticorrelacionados implica em um histórico passivo de *mergers*, sendo assim uma condição necessária para uma galáxia ser relíquia.

Os resultados do estudo são listados a seguir.

- A amostra de galáxias compactas tem, em média, um suporte rotacional maior do que o da amostra controle. Isso está de acordo com um cenário com que esses objetos não passaram por *major mergers* pobres em gás desde sua formação, há aproximadamente 10 bilhões de anos;
- Vários objetos da amostra (cerca de 80% da amostra) apresentam uma forte anticorrelação entre  $h_3$  e  $V/\sigma$ . Isso indica que esses objetos se formaram em *major mergers* ricos em gás, exatamente o esperado para galáxias relíquias;
- Enquanto esses objetos se mostraram como bons candidatos a serem galáxias relíquias, estudos sobre suas populações estelares e metalicidades devem ser realizados, sobretudo em regiões mais externas das galáxias, para que o status de relíquia seja confirmado.

Para dar continuidade a este estudo, pode-se citar as seguintes perspectivas futuras:

- Estender a análise cinemática para distâncias maiores do centro. Já que *minor mergers* tendem a afetar a região externa das galáxias, as propriedades encontradas neste trabalho podem ser válidas apenas para raios pequenos. Um exemplo disso pode ser visto no trabalho de [Yildirim et al. \(2017\)](#), em que a galáxia NGC 1282 apresenta anticorrelação entre  $h_3$  e  $V/\sigma$  apenas dentro de um raio efetivo;

- Estudar as populações estelares dessas galáxias, de modo a determinar a contribuição fotométrica de estrelas jovens. Assim, poderá se obter informação sobre quando a galáxia se tornou quiescente e comparar com o esperado para galáxias relíquias;
- Realizar uma decomposição bojo/disco, a fim de verificar a massa contida em cada componente (FISCHER; SÁNCHEZ; BERNARDI, 2019). Com isso, será possível comparar com simulações para definir se essas galáxias são remanescentes de *major mergers*.

# Referências

- BELLI, S.; NEWMAN, A. B.; ELLIS, R. S. MOSFIRE Spectroscopy of Quiescent Galaxies at  $1.5 < z < 2.5$ . I. Evolution of Structural and Dynamical Properties. *The Astrophysical Journal*, v. 834, n. 1, p. 18, Jan 2017. Citado na página 44.
- BEZANSON, R. et al. Redshift Evolution of the Galaxy Velocity Dispersion Function. *The Astrophysical Journal*, v. 737, n. 2, p. L31, Aug 2011. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 37.
- BEZANSON, R. et al. Spatially resolved stellar kinematics from LEGA-c: Increased rotational support in  $z \sim 0.8$  quiescent galaxies. *The Astrophysical Journal*, American Astronomical Society, v. 858, n. 1, p. 60, may 2018. Citado 3 vezes nas páginas 14, 40 e 41.
- BOURNAUD, F.; ELMEGREEN, B. G. Unstable disks at high redshift: Evidence for smooth accretion in galaxy formation. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 694, n. 2, p. L158–L161, Mar 2009. ISSN 1538-4357. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/694/2/L158>. Citado na página 24.
- BOURNAUD, F.; JOG, C. J.; COMBES, F. Multiple minor mergers: formation of elliptical galaxies and constraints for the growth of spiral disks. *Astronomy and Astrophysics*, v. 476, n. 3, p. 1179–1190, Dec 2007. Citado 3 vezes nas páginas 26, 37 e 45.
- BOUWENS, R. J. et al. Newly Discovered Bright  $z \sim 9$ -10 Galaxies and Improved Constraints on Their Prevalence Using the Full CANDELS Area. *The Astrophysical Journal*, v. 880, n. 1, p. 25, Jul 2019. Citado na página 23.
- BUITRAGO, F. et al. Size Evolution of the Most Massive Galaxies at  $1.7 < z < 3$  from GOODS NICMOS Survey Imaging. *The Astrophysical Journal*, v. 687, n. 2, p. L61, Nov 2008. Citado 3 vezes nas páginas 13, 25 e 29.
- CAPPELLARI, M. Efficient multi-gaussian expansion of galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 333, p. 400–410, 2002. Citado na página 33.
- CAPPELLARI, M. Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, n. 1, p. 798–811, 2017. Citado na página 32.
- CHANG, Y.-Y. et al. Stellar Masses and Star Formation Rates for 1M Galaxies from SDSS+WISE. *The astrophysical journal*, v. 219, n. 1, p. 8, Jul 2015. Citado na página 31.
- CHERINKA, B. et al. Marvin: A Tool Kit for Streamlined Access and Visualization of the SDSS-IV MaNGA Data Set. *The Astronomical Journal*, v. 158, n. 2, p. 74, Aug 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 32.
- EFRON, B.; STEIN, C. The jackknife estimate of variance. *The Annals of Statistics*, The Institute of Mathematical Statistics, v. 9, n. 3, p. 586–596, 05 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1214/aos/1176345462>. Citado na página 37.

- ELMEGREEN, B. G. et al. Bulge and clump evolution in hubble ultra deep field clump clusters, chains and spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 692, n. 1, p. 12–31, Feb 2009. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/692/1/12>>. Citado na página 24.
- EMSELLEM, E. et al. The ATLAS<sup>3D</sup> project - III. A census of the stellar angular momentum within the effective radius of early-type galaxies: unveiling the distribution of fast and slow rotators. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 414, n. 2, p. 888–912, Jun 2011. Citado na página 39.
- FISCHER, J. L.; SÁNCHEZ, H. D.; BERNARDI, M. SDSS-IV MaNGA PyMorph Photometric and Deep Learning Morphological Catalogues and implications for bulge properties and stellar angular momentum. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 483, n. 2, p. 2057–2077, Feb 2019. Citado na página 48.
- FREEMAN, K. C. On the Disks of Spiral and S0 Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 160, p. 811, Jun 1970. Citado na página 34.
- HOFFMAN, L. et al. The imprint of dissipation on the shapes of merger remnant losvds. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 705, n. 1, p. 920–925, oct 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F0004-637x%2F705%2F1%2F920>>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 45.
- HOPKINS, P. F. et al. Mergers and Bulge Formation in  $\Lambda$ CDM: Which Mergers Matter? *The Astrophysical Journal*, v. 715, n. 1, p. 202–229, May 2010. Citado na página 26.
- HOPKINS, P. F. et al. The effects of gas on morphological transformation in mergers: implications for bulge and disc demographics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 397, n. 2, p. 802–814, Aug 2009. Citado na página 26.
- HUBBLE, E.; KIRSHNER, R.; CARROLL, S. *The Realm of the Nebulae*. Yale University Press, 2013. (Mrs. Hepsa Ely Silliman memorial lectures). ISBN 9780300187120. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ggCDNAEACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 21.
- HUERTAS-COMPANY, M. et al. Revisiting the Hubble sequence in the SDSS DR7 spectroscopic sample: a publicly available Bayesian automated classification. *Astronomy and Astrophysics*, v. 525, p. A157, Jan 2011. Citado na página 40.
- LOTZ, J. M. et al. The Rest-Frame Far-Ultraviolet Morphologies of Star-forming Galaxies at  $z \sim 1.5$  and 4. *The Astrophysical Journal*, v. 636, n. 2, p. 592–609, Jan 2006. Citado na página 24.
- MADAU, P.; DICKINSON, M. Cosmic star-formation history. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Annual Reviews, v. 52, n. 1, p. 415–486, Aug 2014. ISSN 1545-4282. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125615>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 24.
- NELSEN, R. *Kendall tau metric*. 2011. Disponível em: <[https://www.encyclopediaofmath.org//index.php?title=Kendall\\_tau\\_metric&oldid=12869](https://www.encyclopediaofmath.org//index.php?title=Kendall_tau_metric&oldid=12869)>. Citado na página 34.

- NEWMAN, A. B. et al. Resolving quiescent galaxies at  $z \geq 2$ . ii. direct measures of rotational support. *The Astrophysical Journal*, American Astronomical Society, v. 862, n. 2, p. 126, Jul 2018. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aacd4f>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 44.
- NEWMAN, A. B. et al. Can Minor Merging Account for the Size Growth of Quiescent Galaxies? New Results from the CANDELS Survey. *The Astrophysical Journal*, v. 746, n. 2, p. 162, Feb 2012. Citado na página 29.
- OOGI, T.; HABE, A. Dry minor mergers and size evolution of high- $z$  compact massive early-type galaxies. In: Umemura, M.; Omukai, K. (Ed.). *American Institute of Physics Conference Series*. [S.l.: s.n.], 2012. (**American Institute of Physics Conference Series**, v. 1480), p. 406–408. Citado na página 28.
- SCHAWINSKI, K. et al. The green valley is a red herring: Galaxy zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 440, n. 1, p. 889–907, Mar 2014. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stu327>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 23.
- SCHREIBER, N. M. F. et al. The SINS Survey: SINFONI Integral Field Spectroscopy of  $z \sim 2$  Star-forming Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 706, n. 2, p. 1364–1428, Dec 2009. Citado na página 25.
- SÉRSIC, J. L. Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, v. 6, p. 41, Jan 1963. Citado na página 24.
- SIMARD, L. et al. A Catalog of Bulge+disk Decompositions and Updated Photometry for 1.12 Million Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal*, v. 196, n. 1, p. 11, Sep 2011. Citado na página 31.
- SIMONS, R. C. et al.  $z \sim 2$ : An Epoch of Disk Assembly. *The Astrophysical Journal*, v. 843, n. 1, p. 46, Jul 2017. Citado na página 25.
- SPIEGEL, M.; LIPSCHUTZ, S.; LIU, J. *Schaum's Outline of Mathematical Handbook of Formulas and Tables*. 3. ed. McGraw-Hill Education, 2008. 169 p. (Schaum's Outline Series). ISBN 9780071548564. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=oHuddtlCu-AC>>. Citado na página 55.
- TACCHELLA, S. et al. Evolution of density profiles in high- $z$  galaxies: compaction and quenching inside-out. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 458, n. 1, p. 242–263, May 2016. Citado na página 28.
- THOMAS, D. et al. Environment and self-regulation in galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 404, n. 4, p. 1775–1789, Jun 2010. Citado na página 32.
- VAN DER MAREL, R. P.; FRANX, M. A New Method for the Identification of Non-Gaussian Line Profiles in Elliptical Galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 407, p. 525, Apr 1993. Citado na página 55.

- VAN DER WEL, A. et al. 3d-hst+candels: The evolution of the galaxy size-mass distribution since  $z=3$ . *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 788, n. 1, p. 28, May 2014. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/788/1/28>>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 25 e 33.
- VAZDEKIS, A. et al. Evolutionary stellar population synthesis with MILES - I. The base models and a new line index system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 404, n. 4, p. 1639–1671, Jun 2010. Citado na página 33.
- WELLONS, S. et al. The formation of massive, compact galaxies at  $z = 2$  in the Illustris simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 449, n. 1, p. 361–372, May 2015. Citado na página 28.
- WILLIAMS, R. J. et al. Detection of quiescent galaxies in a bicolor sequence from  $z=0-2$ . *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 691, n. 2, p. 1879–1895, Feb 2009. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/691/2/1879>>. Citado na página 22.
- WUYTS, S. et al. On Sizes, Kinematics, M/L Gradients, and Light Profiles of Massive Compact Galaxies at  $z \sim 2$ . *The Astrophysical Journal*, v. 722, n. 2, p. 1666–1684, Oct 2010. Citado 3 vezes nas páginas 28, 44 e 45.
- YILDIRIM, A. et al. The structural and dynamical properties of compact elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 468, n. 4, p. 4216–4245, Mar 2017. ISSN 1365-2966. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stx732>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 44 e 47.

# Apêndices



# APÊNDICE A – Polinômios de Gauss-Hermite

A distribuição de velocidades na linha de visada (LOSVD), tanto para o gás quanto para as estrelas, pode ser parametrizada usando polinômios de Gauss-Hermite, introduzidos por [VAN DER MAREL e Franx \(1993\)](#). A LOSVD tem a forma

$$\mathcal{L}(y) = \frac{\exp(-y/2)}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[ 1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right], \quad (\text{A.1})$$

onde  $y = (v - V)/\sigma$ ,  $h_m$  são constantes ajustáveis e  $H_m(y)$  são polinômios de Hermite, que podem ser escritos em termos dos "polinômios de Hermite físicos"  $H_m^{\text{Phys}}(y)$ ,

$$H_m(y) = \frac{H_m^{\text{phys}}(y)}{\sqrt{m! 2^m}}. \quad (\text{A.2})$$

Para este trabalho, apenas os termos com  $m = 3$  e  $m = 4$  são importantes, então usando  $H_3^{\text{Phys}}(y) = 8y^3 - 12y$  e  $H_4^{\text{Phys}}(y) = 16y^4 - 48y^2 + 12$  ([SPIEGEL; LIPSCHUTZ; LIU, 2008](#)), obtemos

$$H_3(y) = \frac{y(2y^2 - 3)}{\sqrt{3}} \quad e \quad H_4(y) = \frac{4(y^2 - 3)y^2 + 3}{\sqrt{24}}. \quad (\text{A.3})$$