

Weligton Nogueira Costa Júnior

# **Objetos estelares compactos na parte central do aglomerado pobre Abell S0740**

Brasil  
Setembro, 2023



Weligton Nogueira Costa Júnior

**Objetos estelares compactos na parte central do  
aglomerado pobre Abell S0740**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Física da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Física, com ênfase em Astrofísica.

Orientadora: Ana Leonor Chies Santiago Santos  
Coorientadora: Cristina Furlanetto

Brasil  
Setembro, 2023





Em memória de Ismail e Walter.



# Agradecimentos

Fazer contas, aprender a programar, interpretar gráficos, pensar em um idioma diferente para ler os artigos, tudo isso não seria possível sem uma infinidade de pessoas nessa caminhada. Primeiro, agradeço aos meus pais, Weligton Nogueira Costa e Caren Carla de Oliveira por todo o suporte emocional e financeiro até a chegada desse momento, e aos meus irmãos Karina Karla de Oliveira Nogueira e Willian Henrique de Oliveira Nogueira, que são e sempre serão a principal fonte de energia em minha vida para que eu esteja sempre lutando, sem eles provavelmente eu não estaria aqui.

A cada dia que passa só tenho a agradecer à minha noiva Caroline Nogueira Haas, ponto fundamental em toda a minha caminhada no mestrado, todo o suporte, toda a ajuda e a cada momento de crise em que eu pensei que não suportaria e ela esteve do meu lado, por aguentar meses em cidades diferentes devido a todo o caos, e aos nossos 7 pets (Arya, Garnet, Luna, Oliver, Brullet, Shouto e Calíope). Agradeço também à minha sogra, Lilian Nogueira que sempre me incentivou a estudar cada dia mais.

Existem muitas pessoas que passam por essa trajetória, talvez eu esqueça de alguns nomes, mas a todos os amigos que fiz durante o mestrado na UFRGS, em especial à Larissa, Gustavo, Gabriela, Augusto, Iara, Neto, Isadora, Ana, Gabriel Roier, amigos que estiveram presentes nesse tempo e têm um lugar especial, e a muitos outros queridos do IF-UFRGS. Ao querido Carlos Melo, agradeço a cada momento de paciência, por entender a minha mudança de área para astrofísica e por muitas vezes me iluminar com o caminho correto em que seguir.

Aos queridos Ivo André, Danilo Porfírio, Kairo Rafael, Augustto César e Thiago Martins, pessoas queridas em meu coração, amigos que nem mesmo a distância pode mudar, fica o meu agradecimento pelos bons momentos.

Agradeço à minha orientadora Ana Chies e Cristina Furlanetto, que fizeram o possível para entender as minhas necessidades durante todo esse período e tiveram uma paciência infinita para que eu conseguisse terminar a vocês meu sincero muito obrigado!

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Física da UFRGS por toda a estrutura fornecida, e ao financiamento da CAPES, que permitiu que em algum momento eu pudesse realizar o sonho de ser apenas um pesquisador feliz.

E agradeço a você que está lendo também este trabalho, sim a você que vai dedicar um pequeno tempo da sua vida para olhar esse trabalho, e espero que seja útil, nem que seja um pouquinho, para evolução da ciência.



*Se você perguntar para algum historiador como ele define sua profissão, ele poderá te dizer algo do tipo: “Somos os seres mais fofoqueiros da história, olhamos o passado a procura de uma boa fofoca e depois escrevemos sobre ela”. Nós astrônomos somos ótimos historiadores, pois nesse momentos estamos fofocando sobre a criação desse Universo, sobre sua evolução de sistemas estelares, sobre como as coisas funcionam. Somos os arqueólogos que encontram as coisas mais antigas possíveis, somos o Indiana Jones sem grandes aventuras ou chapéu na cabeça, mas estamos sempre atrás de boas fofocas que o Universo nos conta e atrás dessa aventura magnífica que é toda essa vastidão do Universo.*

*(Welington Nogueira Costa Júnior)*



# Lista de ilustrações

- Figura 1 – A figura mostra o aglomerado de galáxias SMACS 0723. Essa foi a primeira imagem de campo profundo obtida pelo Telescópio Espacial James Webb. Acessível em: <https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2022/nasa-s-webb-delivers-deepest-infrared-image-of-universe-yet> 23
- Figura 2 – A figura (a) mostra uma imagem do Aglomerado rico de Coma, obtida com o Telescópio Espacial Hubble, do inglês *Hubble Space Telescope* (HST)/Câmera Avançada para Pesquisas, do inglês *Advanced Camera for Surveys* (ACS), onde conseguimos ver uma maior proporção de galáxias elípticas. A figura (b) mostra uma imagem do Aglomerado pobre Abell S0740 obtida com HST/ACS, e em seu centro a gigante elíptica, ESO 325-G004. Créditos: NASA, ESA. . . . . 24
- Figura 3 – Diagrama da visão esquemática da classificação de galáxias de Hubble. Créditos: NASA e ESA. . . . . 25
- Figura 4 – Ilustração esquemática da formação de galáxias no paradigma de formação hierárquica. Imagem retirada de Abraham e van den Bergh (2001). . . 26
- Figura 5 – Distribuição de cores dos aglomerados globulares da galáxia M87, retirada do trabalho Peng et al. (2006). A bimodalidade em cor, sendo primariamente atribuída à diferença na metalicidade, é uma característica compartilhada por muitos sistemas de aglomerados globulares de galáxias massivas no Universo local. . . . . 29
- Figura 6 – A figura mostra a região central do Aglomerado de Fornax, nas bandas B, V e I. Os painéis em destaque mostram uma UCD no painel superior e uma galáxia elíptica anã nucleada no painel inferior. Crédito: A imagem de fundo foi capturada pelo Dr. Michael Hilker da Universidade de Bonn com o telescópio de 2.5m DuPont no Observatório Las Campanas. As imagens dos painéis foram feitas usando o HST por uma equipe liderada pelo Professor Michael Drinkwater da Universidade de Queensland. . . . . 31
- Figura 7 – Relação entre a massa e o raio efetivo de alguns objetos já classificados, onde fica evidente que as Galáxias anãs ultra compactas, do inglês *Ultra Compact Dwarf Galaxies* (UCDs) que estão em uma área de transição entre aglomerados globulares e galáxias anãs elípticas. Figura retirada de Janz et al. (2015). . . . . 32

Figura 8 – Imagem do HST/ACS de ESO 325-G004, mostrando aproximadamente $3.3' \times 3.3'$ do campo na orientação observada, com muitas fontes pontuais claramente visíveis. Essa imagem composta em cores foi construída pela equipe Hubble Heritage (STScI/AURA) a partir de imagens nas bandas F475W, F625W e F814W. Imagem retirada de Blakeslee e De-Graaff (2008). . . . .	33
Figura 9 – Figura ilustrativa das Leis de Kirchhoff para diferentes fontes. Imagem retirada de <a href="http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula18.htm">http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula18.htm</a> . . . . .	34
Figura 10 – Espectros de uma amostra de aglomerados globulares em torno de NGC 5846 para demonstrar a influência do aumento da metalicidade no fluxo contínuo na região azul (observe a escala do eixo ordenado que varia). As faixas amarelas representam as linhas proeminentes. Quando duas faixas de índices se sobrepõem, a mais estreita é sombreada com maior intensidade e o rótulo é elevado para indicar a distinção. Imagem retirada de Puzia et al. (2004) . . . . .	35
Figura 11 – Espectro de FCC47-UCD1, onde a linha preta representa o espectro observado, e a vermelha o modelo ajustado (FAHRION et al., 2019). . . . .	36
Figura 12 – Imagem de FCC47 no filtro F475W do HST/ACS com cerca de $11 \times 11$ kpc. A UCD é destacada no painel ampliado. O retângulo branco mostra o apontamento do campo de visão do MUSE no modo de campo amplo correspondendo a $1'1''$ . Figura retirada do trabalho de Fahrion et al. (2019). . . . .	36
Figura 13 – Diagrama cor-cor que mostra a distribuição de objetos em torno da galáxia ESO 325-G004. A seleção de cores é usada para identificar UCDs e Aglomerados Globulares, do inglês <i>Globular Clusters</i> (GCs), removendo a contaminação de galáxias de fundo e estrelas. Os objetos compactos incluem GCs, UCDs, galáxias distantes e contaminação estelar. A seleção de tamanho foi baseada em ajuste de fotometria superficial, e a comparação entre objetos estendidos e compactos é mostrada. As linhas tracejadas definem a região onde estão os candidatos a Sistemas Estelares Compactos, do inglês <i>Compact Stellar Systems</i> (CSS). Imagem retirada de G2011. . . . .	40
Figura 14 – A figura mostra a região da galáxia ESO 325-G004, onde o campo mais ao centro é o campo de visão observado com o HST ACS/WFC, e o campo mais externo corresponde ao campo de visão observado pelo GMOS. . . . .	41



Figura 15 – Distribuição espacial dos objetos observados, Ascensão Reta (RA) vs. Declinação (Dec). A barra de cor indica a magnitude na banda $g$ (painel esquerdo) e cor $g - i$ (painel direito). A cruz vermelha representa a localização do centro da galáxia ESO 325-G004, os círculos são todas as fontes detectadas pelo GMOS, os triângulos em cinza virados pra baixo são todos os pontos observados com o HST por DeGraaff (2011).	42
Figura 16 – Figura cor-cor, onde o eixo x representa a cor $g - i$ , e o eixo y representa o a cor $r - i$ . Os retângulos verdes são todos as fontes catalogado por DeGraaff (2011) usando o HST/ACS, os pontos laranjas representam todos os pontos observados usando o GMOS, os triângulos roxos são os 37 candidatos selecionados.	46
Figura 17 – A figura representa um zoom no espectro do objeto 16, dentro da faixa de comprimento de onda entre 5500 – 6000 Å.	50
Figura 18 – Diagrama Cor-Magnitude: os círculos laranjas representam os objetos da amostra fotométrica do GMOS, as cruces em verde representam a amostra de G2011, os triângulos roxos representam os nossos 37 candidatos a CSS, e os hexágonos rosas são os nossos candidatos a CSS que possuem $S/N \geq 5$ . Os diamantes vermelhos são candidatos a UCD da NGC 3311 (WEHNER et al., 2008a), a estrela amarela representa a NGC 5044-UCD1 (FAIFER et al., 2017). Os pontos azuis são GCs da NGC3111 (WEHNER et al., 2008b).	54
Figura 19 – Espectros dos 14 objetos da nossa amostra final.	55
Figura 20 – Ajuste dos espectros feito com o PPXF. A linha preta representa o espectro observado, a vermelha o modelo ajustado. O sombreado cinza representa indica região que foi mascarada durante o ajuste, e o sombreado amarelo indica as regiões de linhas espectrais características de CSSs. As linhas verdes verticais são referências das linhas de absorção características. A ordem a partir do painel superior é: objetos 02, 03, 05, 12, 14, 16 e 17.	56
Figura 21 – A linha preta representa o espectro observado, a vermelha o modelo ajustado. O sombreado cinza representa indica região que foi mascarada durante o ajuste, e o sombreado amarelo indica as regiões de linhas espectrais características de CSSs. As linhas verdes verticais são referências das linhas de absorção características. A ordem a partir do painel superior é: objetos 19, 22, 35, 38, 43, 52 e 57.	57

- Figura 22 – Distribuição espacial com barra de cor indicando velocidade radial (painel esquerdo), onde os triângulos representam os objetos da amostra final, e os quadrados as observações feitas por G2011. No painel direito vemos um histograma das velocidades radiais dos objetos da amostra final. . . . . 58
- Figura 23 – Diagrama da velocidade radial dos objetos da amostra final em função da distância ao centro da galáxia ESO 325-G004 (em unidades de raio efetivo da galáxia). A barra de cor indica a cor  $g - i$  do objetos. Os números junto aos pontos indicam o identificador OBJ dos objetos. . . 58
- Figura 24 – Nas 4 painéis temos a relação da idade vs metalicidade dos nossos candidatos a CSS comparados com a simulação do E-MOSAICS (KRUIJSSEN et al., 2019). Na painéis superiores foram utilizados a simulação MW014 e MW015, que possuem uma relação de metalicidade que aumenta gradualmente ao longo do tempo, e nos painéis inferiores vemos as MW009 e MW023, que tiveram um enriquecimento de forma rápida de sua metalicidade. . . . . 60
- Figura 25 – Relação entre razão massa-luminosidade  $M/L$  e metalicidade  $[Fe/H]$ . Os GCs da Via Láctea foram retirados de Baumgardt (2016), Harris (2010). . . . . 61
- Figura 26 – Mosaico com imagens dos 14 objetos da amostra final na banda  $g$  (painel superior esquerdo),  $r$  (painel superior direito) e  $i$  (painel inferior). . . . . 62
- Figura 27 – Diagrama de cor-magnitude, com barra de cores representando os raios em parsec dos 14 objetos da amostra final. Vemos que os objetos mais brilhantes, numa faixa de  $M_g$  entre  $-14$  e  $-16$  mag, também são os que possuem maiores raios, estando por volta de 5 pc. Apenas um dos objetos com maior raio se encontra na faixa abaixo de  $M_g = -14$  mag. Os triângulos cinzas representam a amostra de G2011 e os hexágonos representam os 60 objetos da nossa amostra inicial de candidatos a CSS. 63
- Figura 28 – Diagrama cor x magnitude, com barra de cor mostrando a razão massa-luminosidade dos objetos da amostra final. Os objetos que apresentam maior razão  $M/L$  não são em suma os mais brilhantes, ou seja, aqueles que possuem magnitude absoluta na banda  $g$ ,  $M_g$  entre  $-14$  a  $-16$ . Os hexágonos cinzas representam os 60 objetos iniciais da amostra e os triângulos são os objetos da amostra de G2011. . . . . 64
- Figura 29 – A figura mostra o espectro do objeto 01 ajustado o comprimento de onda para o referencial do universo local. . . . . 65

Figura 30 – Essa imagem nos mostra a ESO 325-G004, que é essa área que apresenta no centro mais luminoso. Imagem retirada do trabalho de (BLAKESLEE; DEGRAAFF, 2008) . . . . . 78

# Sumário

	<b>Lista de ilustrações</b> . . . . .	<b>9</b>
	<b>Sumário</b> . . . . .	<b>14</b>
	<b>Lista de Siglas</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>21</b>
1.1	<b>Aglomerados de galáxias</b> . . . . .	<b>22</b>
1.2	<b>Galáxias</b> . . . . .	<b>24</b>
1.3	<b>Sistemas Estelares Compactos (CSS)</b> . . . . .	<b>28</b>
1.3.1	Aglomerados Globulares (GC) . . . . .	28
1.3.2	Galáxias anãs ultra compactas (UCDs) . . . . .	30
1.4	<b>Espectroscopia</b> . . . . .	<b>33</b>
1.5	<b>Objetivos</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>2</b>	<b>DADOS</b> . . . . .	<b>39</b>
2.1	<b>Dados do Telescópio Espacial Hubble</b> . . . . .	<b>39</b>
2.2	<b>Dados do Observatório Gemini</b> . . . . .	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>45</b>
3.1	<b>Seleção Amostral</b> . . . . .	<b>45</b>
3.2	<b>Penalized Pixel-Fitting (pPXF)</b> . . . . .	<b>46</b>
3.2.1	Cinemática . . . . .	49
3.2.2	Síntese de populações estelares . . . . .	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>53</b>
4.1	<b>Amostra Final</b> . . . . .	<b>53</b>
4.2	<b>Cinemática</b> . . . . .	<b>53</b>
4.3	<b>Populações Estelares da amostra Final</b> . . . . .	<b>58</b>
4.4	<b>O que são os objetos brilhantes e compactos na direção da ESO 325-G004?</b> . . . . .	<b>61</b>
4.5	<b>Comparação com objetos catalogados por G2011</b> . . . . .	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b> . . . . .	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>69</b>
.1	<b>Apêndice A - Press Release</b> . . . . .	<b>77</b>

# Lista de Siglas

- ACS** Câmera Avançada para Pesquisas, do inglês *Advanced Camera for Surveys*. 9–11, 24, 33, 36, 39, 41, 46
- AG** Aglomerados de Galáxias. 22
- CSS** Sistemas Estelares Compactos, do inglês *Compact Stellar Systems*. 10–12, 28, 34–37, 39, 40, 42, 43, 45, 46, 51, 53–57, 60–64, 67, 68
- DG** Galáxia Anã, do inglês *Dwarf Galaxy*. 30
- DM** Matéria escura, do inglês *Dark Matter*. 22
- GCs** Aglomerados Globulares, do inglês *Globular Clusters*. 10–12, 28–30, 32, 34, 35, 37, 39, 40, 42, 45, 51, 53, 54, 59–63, 65, 67, 68
- HST** Telescópio Espacial Hubble, do inglês *Hubble Space Telescope*. 9–11, 24, 31–33, 36, 39–42, 45, 46, 67
- ICM** Meio Intra-Aglomerado, do inglês *intra-cluster medium*. 22
- IMF** Função de massa inicial, do inglês *Initial Mass Function*. 49
- JWST** Telescópio Espacial James Webb, do inglês *James Webb Space Telescope*. 22
- LOSVD** Velocidade ao longo da linha visada, do inglês *line-of-sight velocity distribution*. 46, 48
- SFR** Taxa de Formação Estelar, do inglês *Star Formation Rate*. 49
- SMBH** Buracos Negros Super Massivos, do inglês *Supermassive Black Hole*. 31, 32
- SSP** Populações estelares simples, do inglês *Simple Stellar Population*. 29, 47, 49
- UCDs** Galáxias anãs ultra compactas, do inglês *Ultra Compact Dwarf Galaxies*. 9, 10, 27, 30–32, 35, 37, 39, 40, 42, 45, 51, 53, 61, 63–65, 67, 68

# RESUMO

Estudos sobre a evolução do universo passam diretamente pela compreensão sobre as galáxias, que são objetos constituídos de estrelas, gás, poeira estelar e matéria escura. Sistemas estelares compactos (CSS), como galáxias anãs, aglomerados globulares (GCs) e galáxias anãs ultra compactas (UCDs), desempenham um papel crucial nos estudos da evolução das galáxias. GCs têm seu histórico de formação muitas vezes relacionado à própria galáxia hospedeira. UCDs, por sua vez, podem ser núcleos remanescentes de galáxias anãs, que foram arrancados por efeito de maré ao passarem próximos de outra galáxia. Situada no centro do aglomerado Abell S0740, a galáxia gigante elíptica ESO 325-G004, que está a  $z = 0.034$ , foi objeto de trabalho realizado por Blakeslee e DeGraaff (2008), no qual foram catalogados seus sistemas candidatos a GCs e a UCDs utilizando imagens do telescópio espacial Hubble (HST). Nesta dissertação foram analisados dados de fotometria e de espectroscopia multi-objeto (MOS) obtidos pelo GMOS (Gemini Multi-Object Spectrograph) de candidatos a CSS em torno da ESO 325-G004. Utilizando critérios baseado nas suas cores ( $0.1 \leq g - r \leq 0.6$  e  $0.5 \leq g - i \leq 1.5$ ) e análise visual de linhas de absorção características de CSS nos espectros, foram identificados 14 candidatos a CSS ao redor de ESO 325-G004. Foi realizada uma análise da cinemática e das populações estelares destes objetos, para os quais foram determinadas velocidades radiais  $-93.55 \text{ km/s} \leq V_r \leq 333.89 \text{ km/s}$  e metalicidade  $-0.95 \leq [Fe/H] \leq 0.047$ . Os candidatos a CSS que apresentam cores  $g - i$  mais vermelhas, se mostraram mais ricos em metais, alguns possuindo uma razão massa-luminosidade  $M/L \geq 5$ . Sete objetos apresentaram magnitude na faixa  $-14 \leq M_g \leq -16$ , valores muito altos para a categoria de CSS, porém apresentando idade, metalicidade,  $M/L$  e cor ( $g - i$ ) típicos de CSS. A opção de serem galáxias compactas é descartada, pois precisariam apresentar raios acima de 100 pc, enquanto que os valores estimados estão na faixa 4 – 5 pc. Já os candidatos a CSS que apresentam cores  $g - i$  mais próximas do azul, se mostraram pobres em metais, e mais condizente com o que se espera de GCs. Desta forma, concluímos que 7 candidatos possuem características proeminentes de UCDs e 7 são candidatos a GCs.

**Palavras-chave:** aglomerados globulares, galáxias anãs ultra compactas, populações estelares, galáxias elípticas.

# ABSTRACT

Studies on the evolution of the universe directly involve understanding galaxies, which are objects composed of stars, gas, stellar dust, and dark matter. Compact stellar systems (CSS), such as dwarf galaxies, globular clusters (GCs), and ultra-compact dwarf galaxies (UCDs), play a crucial role in galaxy evolution studies. GCs often have their formation history linked to the host galaxy itself. UCDs, on the other hand, might be remnants of dwarf galaxies, stripped away by tidal forces as they pass close to another galaxy. Situated at the center of the Abell S0740 cluster, the giant elliptical galaxy ESO 325-G004, located at  $z = 0.034$ , was the subject of work conducted by Blakeslee & DeGraaff (2008), cataloging its candidate GCs and UCDs using images from the Hubble Space Telescope (HST). This dissertation analyzed photometry and multi-object spectroscopy (MOS) data obtained by the GMOS (Gemini Multi-Object Spectrograph) for CSS candidates around ESO 325-G004. Using criteria based on their colors ( $0.1 \leq g - r \leq 0.6$  and  $0.5 \leq g - i \leq 1.5$ ) and visual analysis of absorption lines characteristic of CSS in their spectra, 14 CSS candidates were identified around ESO 325-G004. We analyzed the kinematics and the stellar population of these objects, determining radial velocities  $-93.55 \text{ km/s} \leq V_r \leq 333.89 \text{ km/s}$  and metallicity  $-0.95 \leq [Fe/H] \leq 0.047$ . CSS candidates exhibiting redder colors ( $g-i$ ) showed higher metallicity, with some having a mass-to-light ratio  $M/L \geq 5$ . Seven objects displayed magnitudes in the range  $-14 \leq M_g \leq -16$ , values significantly high for the CSS category, yet exhibiting typical CSS characteristics in terms of age, metallicity,  $M/L$ , and color ( $g-i$ ). The possibility of being compact galaxies is discarded, as they would need to have radii above 100 pc, whereas estimated values fall within the range of 4 – 5 pc. On the other hand, CSS candidates with bluer colors ( $g-i$ ) showed lower metallicity, more in line with expectations for GCs. Thus, we concluded that 7 candidates exhibit prominent UCD characteristics, while 7 are candidates for GCs.

**Keywords:** globular clusters, ultra-compact dwarf galaxies, stellar populations, elliptical galaxies.





numerado 19



# 1 Introdução

A busca pela compreensão da natureza e do Universo sempre influenciou a evolução da humanidade, desde a descoberta do fogo até a invenção da roda. Paralelamente a isso, a observação do céu desempenhou um papel fundamental, seja para se orientar pelas estrelas, determinar a hora com a posição relativa do Sol, compreender as estações do ano ou criar o calendário ocidental baseado nas fases lunares. Durante muitos séculos, a Astronomia estava limitada ao que podia ser visto a olho nu, utilizando-se apenas da visão humana para explorar o céu noturno. A invenção do telescópio, creditada a Hans Lippershey e popularizada por Galileu no século XVII, representou um marco significativo e permitiu avanços substanciais nas previsões astronômicas e nas observações.

Ao longo do século XVIII, após um pouco mais de cem anos de utilização de telescópios, uma variedade de objetos recém-descobertos começou a ser catalogada em uma categoria que não se enquadrava em estrelas, planetas ou objetos errantes, como meteoros e cometas. Esses corpos, extensos e difusos, foram designados como “nebulosas”. Atualmente, compreendemos que esse termo engloba diversos tipos de objetos, a maioria situada em nossa própria Galáxia, como nuvens de gás iluminadas por estrelas, ou gás expelido por estrelas em estágios avançados de evolução, além de aglomerados estelares.

Até o início do século XX, a grande dificuldade residia em determinar a distância desses objetos. Cerca de 15000 nebulosas estavam catalogadas, algumas corretamente identificadas como aglomerados estelares ou nebulosas gasosas. No entanto, as nebulosas espirais não se encaixavam nessas classificações. Harlow Shapley e Heber Doust Curtis, do Mount Wilson Observatory e Lick Observatory, respectivamente, protagonizaram um intenso debate sobre se essas nebulosas faziam parte de nossa Galáxia ou eram objetos extragalácticos. O famoso debate de 1920 entre eles não resolveu a questão.

A situação mudou em 1923, quando Edwin Powell Hubble forneceu evidências conclusivas ao identificar uma variável Cefeida na “nebulosa” de Andrômeda (M31). Utilizando a relação entre o período e a luminosidade das Cefeidas, Hubble calculou a distância entre Andrômeda e a Via Láctea, demonstrando que estava além dos limites de nossa Galáxia, confirmando Andrômeda como uma galáxia independente. Isso marca o início da área de Astronomia Extragaláctica. Com pouco mais de um século de investigações sobre galáxias e o contínuo avanço dos equipamentos, nossa compreensão desses objetos tem crescido de maneira exponencial.

Os sistemas estelares compactos, que incluem aglomerados globulares e galáxias anãs ultra compactas, desempenham um papel muito importante na compreensão da evolução das galáxias. Esses sistemas fornecem pistas valiosas sobre os processos de formação estelar, sobre a história de fusões galácticas e sobre as condições do ambiente que moldam

o desenvolvimento das galáxias ao longo do tempo.

Nesta dissertação, estudaremos sistemas estelares compactos que se encontram ao redor da galáxia gigante elíptica ESO 325-G004, que se encontra no centro do aglomerado Abell S0740. Neste capítulo faremos uma introdução ao que são aglomerados de galáxias na seção 1.1, e logo em seguida, na seção 1.2, trataremos do que são as galáxias, apresentando uma breve revisão sobre formação, evolução e classificação morfológica. Na seção 1.3, introduziremos os sistemas estelares compactos, seguido de uma breve revisão sobre técnicas de espectroscopia utilizadas para analisar estes objetos na seção 1.4. Finalmente, apresentamos os objetivos desta dissertação na seção 1.5.

## 1.1 Aglomerados de galáxias

Os Aglomerados de Galáxias (AG) são as maiores estruturas gravitacionalmente colapsadas encontradas no Universo, com massas da ordem de  $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$ , contendo centenas a milhares de galáxias. Como exemplo, a figura 1 mostra uma imagem obtida pelo Telescópio Espacial James Webb, do inglês James Webb Space Telescope (JWST) do aglomerado SMACS 0723, que também é uma lente gravitacional.

No entanto, o componente visível de um aglomerado, as galáxias, representa apenas uma pequena fração de sua massa total. A maior parte da matéria em aglomerados de galáxias é constituída por Matéria escura, do inglês *Dark Matter* (DM), um tipo de matéria não luminosa que não interage diretamente com a radiação eletromagnética, mas exerce influência gravitacional. Além disso, os AG também são constituídos por um plasma quente e opticamente fino, que preenche o espaço entre as galáxias e emite radiação em raios-X, chamado de Meio Intra-Aglomerado, do inglês *intra-cluster medium* (ICM).

Assim, os AG têm como componente principal em sua constituição um halo de matéria, que contribui para a formação de um poço de potencial gravitacional do aglomerado. A grande concentração de DM é essencial para explicar o quão profundo o poço de potencial gravitacional dessas estruturas são (BAHCALL, 1977). O ICM e as galáxias constituem apenas 15% do total da massa, sendo o componente galáctico o que menos contribui, com apenas 1% (SARTORIS et al., 2020).

A classificação de aglomerados de galáxias é uma tarefa complexa que envolve a análise de diversas características, como o número de galáxias, a distribuição espacial, a massa total e a natureza dinâmica do aglomerado. Diversos esquemas de classificação foram propostos na literatura, mas o esquema utilizado com mais frequência se baseia na quantidade de galáxias que contêm. Os chamados aglomerados pobres são aqueles que contêm uma quantidade menor de galáxias, da ordem de centenas, e os que possuem da ordem de milhares de membros serão chamados de aglomerados ricos (LIMA NETO, 2020).

Ao longo do tempo, foram sendo criadas maneiras diferentes de classificar os aglomerados ricos, podendo classificá-los a partir das galáxias mais brilhantes dentro do aglome-



Figura 1 – A figura mostra o aglomerado de galáxias SMACS 0723. Essa foi a primeira imagem de campo profundo obtida pelo Telescópio Espacial James Webb. Acessível em: (<https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2022/nasa-s-webb-delivers-deepest-infrared-image-of-universe-yet>)

rado (ROOD; SASTRY, 1971; STRUBLE; ROOD, 1982), ou em relação à diferença das magnitudes entre as galáxias mais brilhantes (BAUTZ; MORGAN, 1970). Há também a classificação entre rico, intermediário e pobre baseada em suas densidades superficiais de massa (ABELL, 1976).

Na figura 2, vemos no painel esquerdo um aglomerado rico de galáxias bastante estudado, o Aglomerado de Coma, que possui mais de 1000 galáxias catalogadas. No painel direito, vemos o aglomerado com o qual trabalharemos, o Abell S0740, sendo este um dos sistemas da lista de aglomerados pobres classificados por Abell, Corwin Harold G. e Olowin (1989), que não atendeu aos critérios mínimos de riqueza do catálogo original de Abell (ABELL, 1958).

Os aglomerados de galáxias desempenham um papel crucial na interseção entre a Astrofísica e a Cosmologia, fornecendo informações valiosas sobre as condições iniciais do Universo (KRAVTSOV; BORGANI, 2012). Sua densidade estrutural os torna ideais para investigar os processos envolvidos na formação das galáxias e seus efeitos no meio intergaláctico circundante.



Figura 2 – A figura (a) mostra uma imagem do Aglomerado rico de Coma, obtida com o HST/ACS, onde conseguimos ver uma maior proporção de galáxias elípticas. A figura (b) mostra uma imagem do Aglomerado pobre Abell S0740 obtida com HST/ACS, e em seu centro a gigante elíptica, ESO 325-G004. Créditos: NASA, ESA.

A própria morfologia das galáxias pode ser resultado de sua interação com o ambiente do aglomerado ao qual ela pertence (SANDAGE; SANDAGE; KRISTIAN, 1975; BUTA, 2013). A relação morfologia-densidade (DRESSLER, 1980), mostra que em aglomerados ricos aumenta a proporção de galáxias elípticas em relação ao campo.

## 1.2 Galáxias

Compreender como as galáxias se desenvolvem está intrinsecamente ligado a compreender a evolução do próprio Universo. Em pouco mais de um século de estudos e observações sobre galáxias, encontramos a melhor maneira de defini-las da seguinte forma: são sistemas compostos por bilhões de estrelas, poeira e gás, dentro de um halo de matéria escura. Esses objetos gigantes não possuem sempre o mesmo formato, e foi proposto por Edwin Hubble uma forma de classificação baseada em sua morfologia visual, que consiste em três categorias principais: elípticas, lenticulares, espirais, espirais barradas e irregulares, como podemos ver na figura 3.

A morfologia das galáxias é de extrema importância para a compreensão sobre o histórico de como se formaram e evoluíram. Um bom exemplo disso são as galáxias elípticas gigantes, encontradas no centro de aglomerados, que possuem uma forma elipsoidal sem estruturas distintas de disco ou braços. Sua formação provavelmente ocorre pela incorporação de muitas galáxias no ambiente de alta densidade do aglomerado de galáxias (LA BARBERA et al., 2014; FITZPATRICK; GRAVES, 2014; INAGAKI et al., 2014).

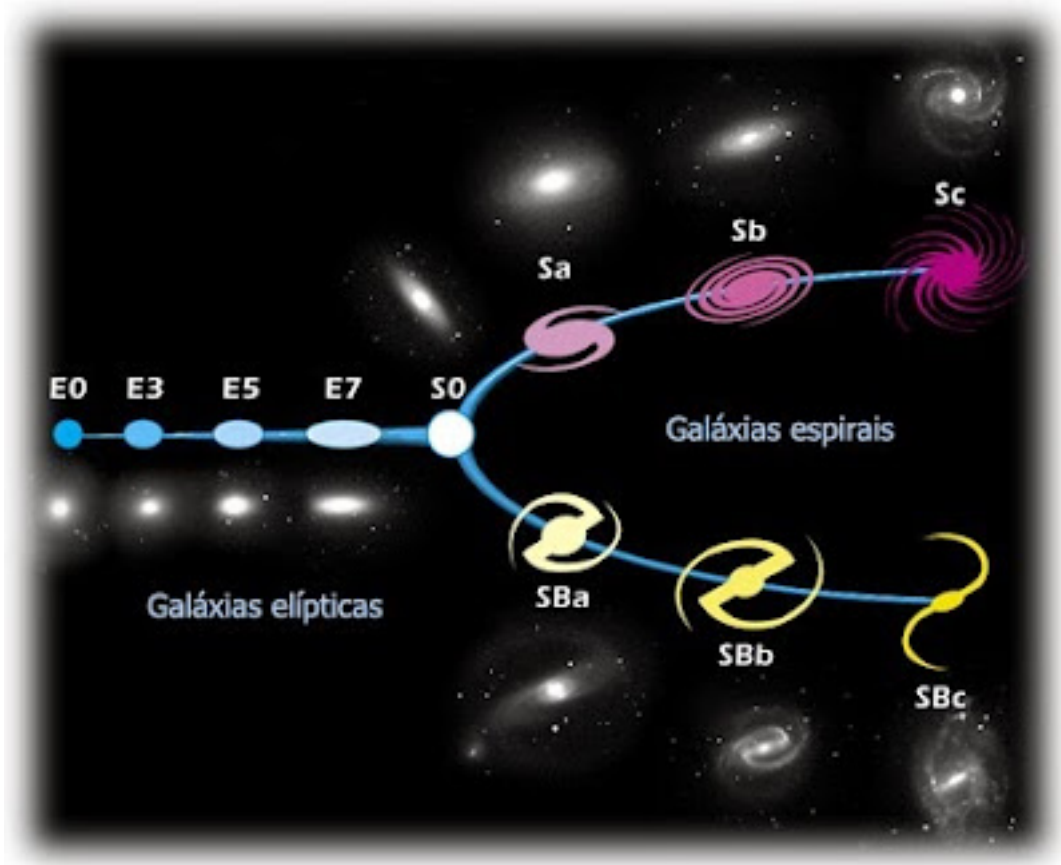


Figura 3 – Diagrama da visão esquemática da classificação de galáxias de Hubble. Créditos: NASA e ESA.

Entretanto, o processo de formação das galáxias não é algo simples, e diversos fatores influenciam na morfologia das galáxias. O processo de formação de galáxias pode ser resumido da seguinte forma (ver figura 4). No universo primordial, momentos após o Big Bang, pequenas variações na densidade da matéria levam à formação de regiões mais densas, conhecidas como sobredensidades. Sob a influência da gravidade, as sobredensidades começam a colapsar. O gás e a matéria escura presentes nessas regiões densas convergem para formar estruturas maiores, conhecidas como halos de matéria escura.

Dentro desses halos, o gás começa a se acumular e esfriar. Isso leva à formação de protogaláxias, aglomerações de gás e matéria escura que são os precursores das galáxias. À medida que as protogaláxias continuam a se contrair, a pressão e a temperatura aumentam no seu interior. Esse processo desencadeia a formação estelar, com o gás colapsando para formar as primeiras estrelas (WHITE; REES, 1978; ELMEGREEN; EFREMOV, 1997; TEGMARK et al., 1997). Quando o gás começa a colapsar e se concentrar nas protogaláxias, a conservação do momento angular faz com que a rotação do sistema aumente. Esse tipo de formação pode ser observado em objetos distantes, com alto *redshift* ( $z$ ), que apresentam estruturas em formato de disco e exibem movimento de rotação (SHAPIRO; GENZEL; SCHREIBER, 2010; GARLAND et al., 2015).



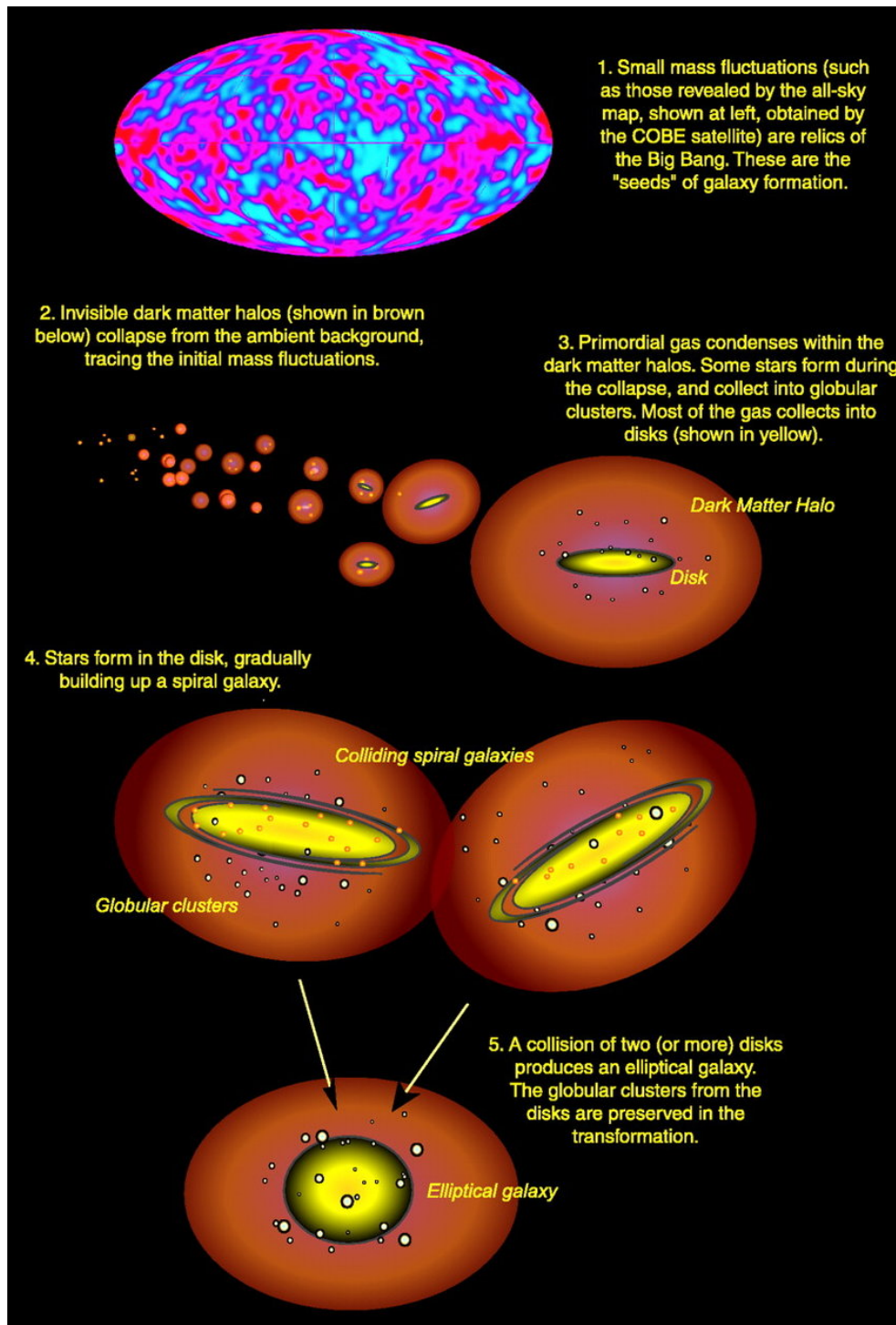


Figura 4 – Ilustração esquemática da formação de galáxias no paradigma de formação hierárquica. Imagem retirada de Abraham e van den Bergh (2001).

No atual paradigma de formação hierárquica, galáxias maiores se formam através da fusão de galáxias menores (GUNN; GOTT III, 1972; PRESS; SCHECHTER, 1974; WHITE; REES, 1978). Essas galáxias menores não possuem estrelas tão ricas em metais quanto as galáxias maiores, e abrigam estrelas e aglomerados estelares com baixa quantidade de metais. À medida que essas galáxias menores se fundem com galáxias



maiores, contribuem para a formação das populações estelares presentes nos halos das galáxias massivas que observamos atualmente (HUANG et al., 2016; PASTORELLO et al., 2015; LACERNA et al., 2020). Acredita-se atualmente que diferentes históricos de fusões de galáxias sejam o principal motivo para encontrarmos esses objetos com morfologias distintas entre si (PASTORELLO et al., 2015; IODICE et al., 2019; BECKMAN; CARRETERO; VAZDEKIS, 2008).

A formação e evolução das galáxias disco, sejam elas espirais ou lenticulares, provavelmente envolve fusões com um número consideravelmente menor de galáxias menores ao longo de sua história (BEKKI et al., 2003). Em alguns casos, até mesmo uma única fusão pode ser capaz de provocar transformações morfológicas ou influenciar a composição estelar (BORLAFF et al., 2014). Já no caso das galáxias anãs, o cenário se torna mais diversificado, com algumas exibindo uma atividade estelar intensa (ÖSTLIN et al., 2004; THRONSON; TELESCO, 1986), enquanto outras podem se assemelhar a galáxias elípticas, com escassa ou nenhuma atividade atual de formação estelar (MILLER et al., 1998).

Contudo, efeitos ambientais também podem afetar a evolução das galáxias, como no caso das galáxias conhecidas como Galáxias Água Viva (*Jellyfish Galaxy*, em inglês), que têm esse nome devido a seu formato que se assemelha a esses animais encontrados na Terra, um efeito causado pela perda de parte do gás, que é arrancado do centro de seus corpos luminosos devido à um efeito conhecido como pressão de arraste (EBELING; STEPHENSON; EDGE, 2014). Este fenômeno ocorre quando a interação com o meio interestelar resulta na remoção de material, influenciando a morfologia e o comportamento das galáxias ao longo do tempo (GÖLLER et al., 2023; LOURENÇO et al., 2023). O caso das UCDs, que veremos com mais detalhes na seção 1.3.2, pode representar mais um tipo de efeito ambiental, o efeito de maré, que no caso desse objetos arranca as bordas mais externas de uma galáxia menor ao se aproximar de uma galáxia gigante, e assim restando apenas o núcleo (BLAKESLEE, 2007).

Qualquer outro motivo que faça com que a galáxia tenha algum tipo de privação de gás pode interferir em sua morfologia (GUNN; GOTT III, 1972; BOSELLI; GAVAZZI, 2006). Todos esses efeitos terão um impacto significativo no gás molecular frio presente nas galáxias, resultando no aumento ou redução da formação estelar em áreas específicas ou em toda a galáxia (EBELING; KALITA, 2019).

Além disso, a formação estelar e atividade de buracos negros supermassivos no centro das galáxias produzem *feedback*, liberando energia no meio interestelar. Esse fenômeno também influencia a dinâmica e evolução das galáxias ao regular a formação estelar e a distribuição de gás (FABIAN, 2012).

O histórico de formação estelar de uma galáxia nos dá muitas informações sobre sua origem, sobre possíveis fusões e sua morfologia. Por isso, compreender também sistemas estelares que não são grandes o suficiente ou não possuem matéria escura para serem cha-

mados de galáxias se faz importante. Na próxima seção, introduziremos alguns exemplos desses objetos e descreveremos como eles estão ligados à própria história de formação da galáxia.

## 1.3 Sistemas Estelares Compactos (CSS)

Em galáxias gigantes, é comum encontrarmos CSS, sejam eles os aglomerados globulares ou as galáxias anãs ultra compactas. Quanto mais distantes olhamos no Universo, mais complexo e difícil é estudar esses objetos. Isto se deve por seus tamanhos serem muito pequenos (da ordem de dezenas a centenas de parsecs), o que os torna muito difíceis de resolver, mesmo com os melhores telescópios disponíveis atualmente.

Estudar os CSSs pode nos trazer informações valiosas sobre a evolução da sua galáxia hospedeira. Nas próximas duas seções, discutiremos sobre esses sistemas estelares compactos, suas principais características e seus possíveis cenários de formação.

### 1.3.1 Aglomerados Globulares (GC)

Os GCs, são encontrados ao redor das galáxias observadas, independentemente do tipo morfológico, porém, em quantidades diferentes. São definidos como um conjunto denso de estrelas que pode ter se formado no início da história de formação estelar de sua galáxia hospedeira, tendo uma idade muitas vezes superior a 10 bilhões de anos (HARRIS et al., 2016; CHIES-SANTOS et al., 2011), com massas entre  $10^4 M_{\odot}$  e  $10^6 M_{\odot}$ , e raios de meia-luz muitas vezes menores que 10 parsecs (BRODIE; STRADER, 2006).

As propriedades de dinâmica, metalicidade, idade e abundâncias químicas dos GCs podem servir como referências para a compreensão de importantes eventos na história de uma galáxia. Isso ocorre porque a formação dos GCs pode estar ligada a algum episódio importante de formação estelar, seja relacionado à formação estelar da galáxia na qual estão inseridos ou a fusões (BRODIE et al., 2014; OSER et al., 2010).

Galáxias chamadas de *Early-Type* podem abrigar um número bastante expressivo de GCs (BRODIE; STRADER, 2006). Por exemplo, estima-se que a gigante elíptica M87, localizada no centro do aglomerado de Virgem, possui mais de 17000 GCs (OLDHAM; AUGER, 2016). Por outro lado, galáxias do tipo *Late-Type*, como a própria Via Láctea, podem abrigar cerca de 200 GCs (MASSARI; KOPPELMAN; HELMI, 2019).

Em galáxias lenticulares, como a NGC 3115, pode ser encontrado um número extremamente alto de mais de 1000 GCs (ZANATTA et al., 2018; JENNINGS et al., 2014). A galáxia NGC 1277, apresenta uma população de GCs exclusivamente vermelhos, sugerindo que ela pode não ter acretao aglomerados azuis, apesar de sua grande massa (BEASLEY, 2020).

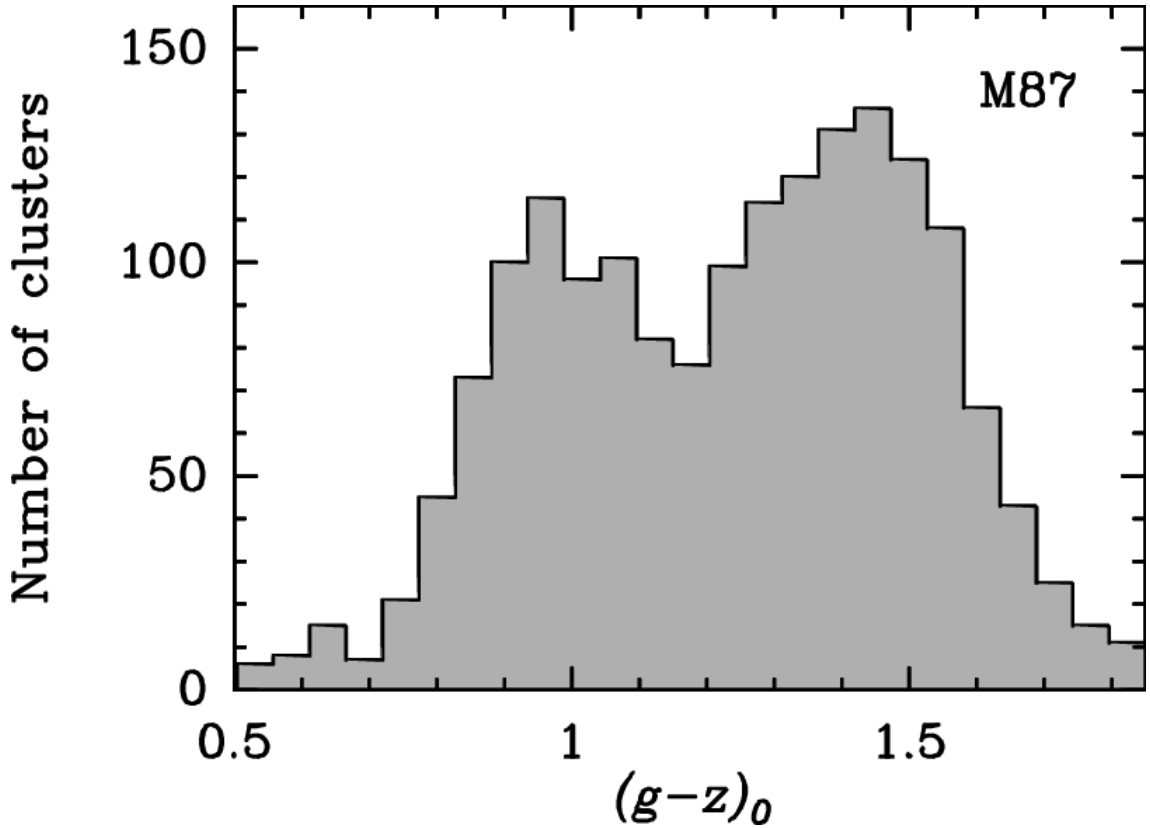


Figura 5 – Distribuição de cores dos aglomerados globulares da galáxia M87, retirada do trabalho Peng et al. (2006). A bimodalidade em cor, sendo primariamente atribuída à diferença na metalicidade, é uma característica compartilhada por muitos sistemas de aglomerados globulares de galáxias massivas no Universo local.

Quando encontramos GCs no halo de uma galáxia, é mais provável que eles sejam mais azuis e, portanto, pobres em metais, o oposto de uma população mais vermelha, rica em metais, encontrada principalmente no centro (CHIES-SANTOS; LARSEN; KISSLER-PATIG, 2012; BRODIE; STRADER, 2006; ASHMAN; Zepf, 2001). Essa bimodalidade nas cores ópticas, pode estar diretamente relacionada à evolução da galáxia. Na figura 5, vemos um exemplo dessa bimodalidade nas cores dos GCs da galáxia M87. Os GCs mais vermelhos podem ter populações estelares semelhantes às de galáxias do tipo *Early-Type*, ou elípticas (CORTESE et al., 2013).

Autores como Brodie e Strader (2006) nos informam que essas duas categorias distintas de aglomerados globulares em termos de cores geralmente não apresentam diferenças em massa ou tamanho. No entanto, como apontado por Yoon, Yi e Lee (2006), a metalicidade pode variar nas populações de GCs que seguem essa diferença de cores, mas essa correlação não pode ser considerada universal (VILLAUME et al., 2019). Vários autores afirmam que isso decorre da seleção de modelos de Populações estelares simples, do inglês *Simple Stellar Population* (SSP), ou das incertezas fotométricas, ou ainda das variações na distribuição de metalicidade (CANTIELLO; BLAKESLEE, 2007; LEE; CHUNG; YOON,

2019; BEASLEY, 2020).

Acredita-se que os GCs mais internos tenham se formado dentro da própria galáxia em eventos antigos de formação estelar, enquanto os GCs adquiridos de outras galáxias durante possíveis processos de fusão tendem a estar localizados nas regiões externas (BRODIE; STRADER, 2006). Alguns exemplos mostram populações de GCs que indicam histórias evolutivas únicas, como a presença de GCs com bimodalidade de cores que pode indicar fusões intensas (HILKER et al., 2018). Além disso, a influência da fricção dinâmica pode fazer com que o objeto perca energia, favorecendo processos de fusão, por exemplo, pode levar à destruição dos GCs ao longo do tempo. Isso é especialmente relevante nas regiões centrais das galáxias e nas regiões internas das elípticas, onde as estrelas que um dia pertenceram aos GCs contribuem para as populações estelares atuais (FORBES; BRODIE; LARSEN, 2001).

A galáxia ESO 325-G004, que será a galáxia do nosso estudo, é uma galáxia elíptica. Espera-se encontrar vários objetos compactos, como GCs ao seu redor, que podem estar ligados diretamente com a história da sua formação e evolução.

### 1.3.2 Galáxias anãs ultra compactas (UCDs)

Dentre a classe de Sistemas Estelares Compactos, estão as UCDs, que foram inicialmente encontradas de forma distinta por Hilker, Infante, L. e Richtler, T. (1999) e Drinkwater et al. (2000), observando o aglomerado de galáxias de Fornax. A figura 6 ilustra um exemplo desses objetos no sistema de Fornax.

UCDs são objetos que possuem massa entre  $10^7$  e  $10^8 M_{\odot}$  e raio efetivo de aproximadamente 10 – 100 pc, com magnitude absoluta entre  $-13.0 \leq M_g \leq 10.0$  mag (MIESKE et al., 2008; DRINKWATER et al., 2000), e muitos deles possuem metalicidade ( $[Fe/H] \approx -0.5$  dex) similar aos GCs vermelhos ricos em metais encontrados no bojo de galáxias gigantes (HILKER et al., 2007).

Apesar de serem similares em cor e magnitude absoluta aos GCs, as UCDs mostram sinais de terem experimentado uma história de formação complexa, provavelmente envolvendo a fusão de múltiplos sistemas estelares, o que difere do que vimos na seção 1.3.1. Além do aglomerado de Fornax, que podemos ver na figura 6, UCDs foram identificadas em vários aglomerados de galáxias próximos, como nos aglomerados de Virgo e Hydra (HASEGAN, 2005; WEHNER et al., 2008a), e de acordo com Evstigneeva et al. (2007), é raro encontrar esses objetos fora de algum aglomerado. No entanto, recentemente Voggel et al. (2020) encontraram evidências da existência de UCDs ao redor da galáxia Centaurus A.

O fato de possuírem características morfológicas com uma combinação única entre um tamanho compacto e um histórico de formação complexo nos leva à possibilidade desses objetos serem algo transicional entre GCs e Galáxia Anã, do inglês *Dwarf Galaxy*

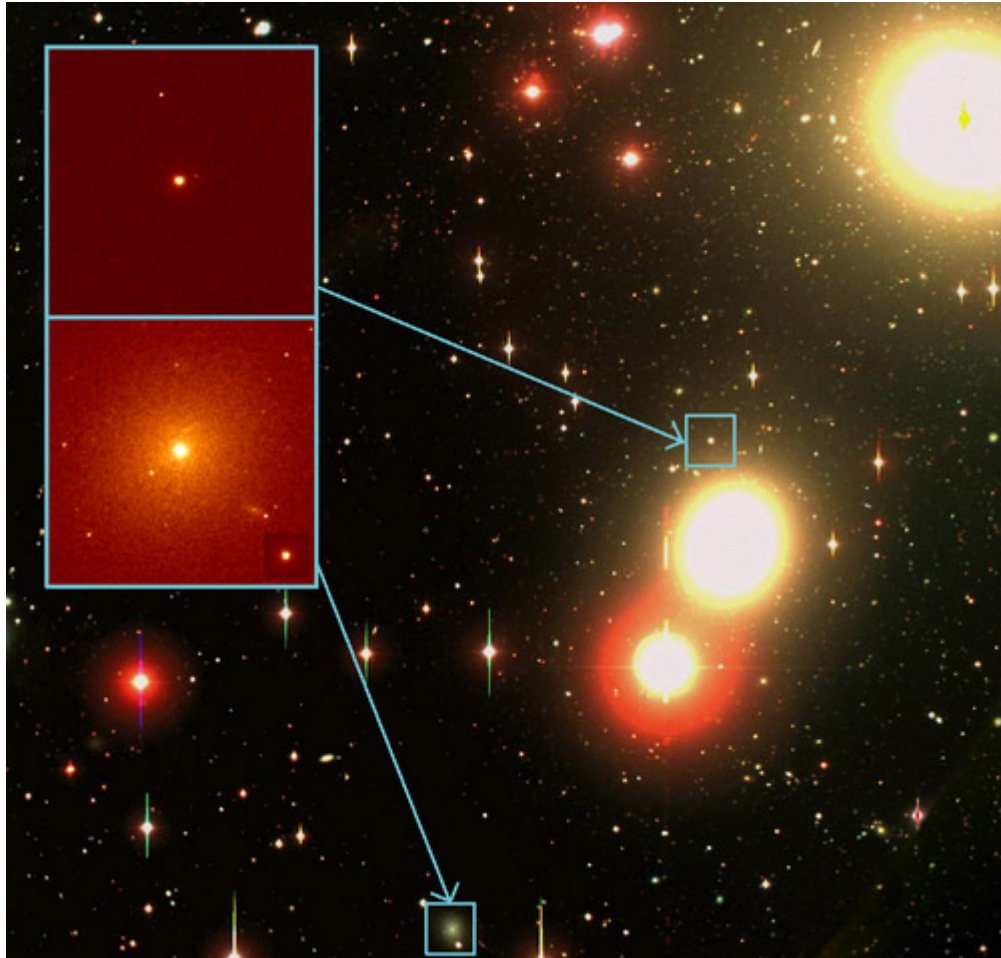


Figura 6 – A figura mostra a região central do Aglomerado de Fornax, nas bandas B, V e I. Os painéis em destaque mostram uma UCD no painel superior e uma galáxia elíptica anã nucleada no painel inferior. Crédito: A imagem de fundo foi capturada pelo Dr. Michael Hilker da Universidade de Bonn com o telescópio de 2.5m DuPont no Observatório Las Campanas. As imagens dos painéis foram feitas usando o HST por uma equipe liderada pelo Professor Michael Drinkwater da Universidade de Queensland.

(DG) (MISGELD; HILKER, 2011; PFEFFER; BAUMGARDT, 2013; JANZ et al., 2015; NORRIS et al., 2014), como podemos ver na figura 7, que nos mostra uma relação entre a massa desses objetos e seus respectivos raios.

Nas últimas duas décadas de estudos, foram levantadas algumas possibilidades sobre a formação das UCDs, dentre elas é válido destacar dois cenários. A primeira hipótese nos diz que esses objetos são núcleos remanescentes de galáxias (BEKKI et al., 2003), ao se aproximar do poço de potencial de uma galáxia gigante. Devido ao efeito de maré, estrelas da parte mais externa podem ser arrancadas, restando apenas as que se encontram mais próximas do núcleo.

A presença de Buracos Negros Super Massivos, do inglês *Supermassive Black Hole* (SMBH) no centro das UCDs pode ser um forte indicativo de que são remanescentes de galáxias, e já existem confirmações disso, como o caso da M59-UCD 3 (AHN et al., 2018).

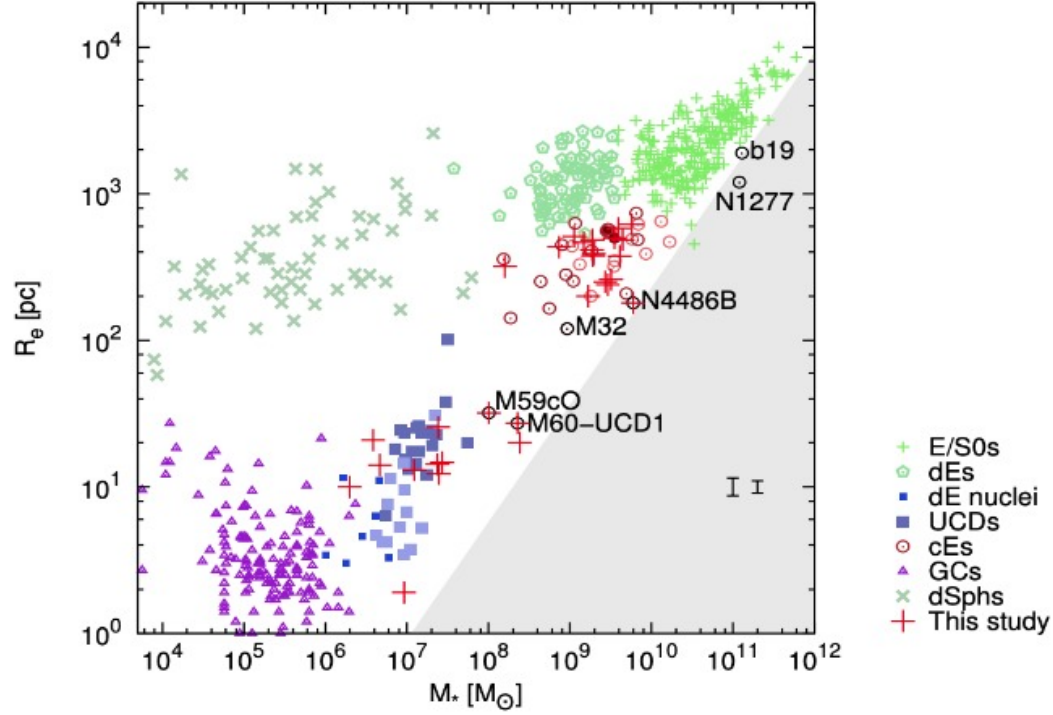


Figura 7 – Relação entre a massa e o raio efetivo de alguns objetos já classificados, onde fica evidente que as UCDs que estão em uma área de transição entre aglomerados globulares e galáxias anãs elípticas. Figura retirada de Janz et al. (2015).

A presença de um SMBH com massa em torno de 10 – 15% da massa total das UCDs, pode, inclusive ajudar na explicação de uma elevada razão massa-luminosidade ( $M/L$ ) para esse tipo de objeto (MIESKE et al., ). Simulações também podem ser o ponto chave para a confirmação dessas hipóteses, comparando com as UCDs observadas (MAYES et al., 2023) .

A outra hipótese para a formação de UCDs foi proposta por Hilker (2009), que sugere que as UCDs podem ser galáxias anãs, onde o seu histórico de formação estelar se deu em um pequeno halo de matéria escura com baixa massa. Segundo Bekki et al. (2003), estudos nos GCs ao redor da Via Láctea não mostram evidências da presença de halos de matéria escura, ou mesmo SMBH, em seus centros.

Localizado no centro do Abell S0740 (ver seção 1.1), com *redshift*  $z = 0.034$ , a ESO 325-G004 (ver figura 8) é a galáxia do sistema de lentes gravitacionais mais próximo que conhecemos e possui uma dispersão de velocidade de aproximadamente 300 km/s, bastante similar ao que encontramos em Fornax (SMITH; LUCEY, 2013). DeGraaff (2011) usando imagens do HST nas bandas F475W, F625W e F814W, identificou 43 candidatos a GCs, 15 candidatos a UCDs e 26 candidatas a anãs compactas em torno da galáxia ESO 325-G004. Este catálogo de objetos será utilizado em nossas análises da seção 4.

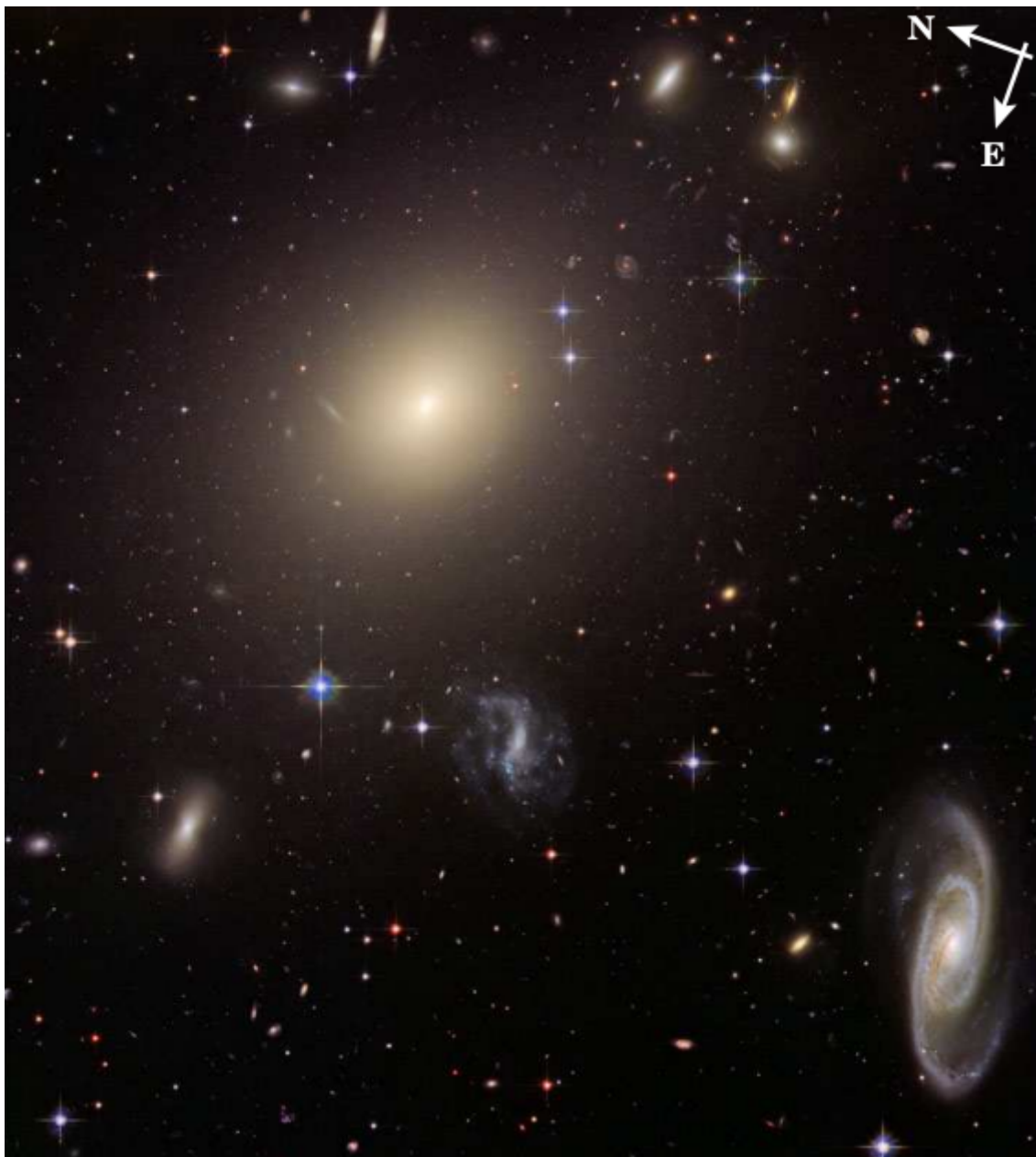


Figura 8 – Imagem do HST/ACS de ESO 325-G004, mostrando aproximadamente  $3.3' \times 3.3'$  do campo na orientação observada, com muitas fontes pontuais claramente visíveis. Essa imagem composta em cores foi construída pela equipe Hubble Heritage (STScI/AURA) a partir de imagens nas bandas F475W, F625W e F814W. Imagem retirada de Blakeslee e DeGraaff (2008).

## 1.4 Espectroscopia

A espectroscopia óptica é uma técnica de grande valor em vários tipos de estudos, abrangendo desde objetos microscópicos, como na física de partículas ou na química, até objetos extremamente grandes e macroscópicos na astrofísica. Essa técnica nos permite utilizar a luz emitida ou refletida por um objeto, separando-a em seus diferentes comprimentos de onda, o que nos possibilita compreender vários fatores físicos dos objetos de



estudo.

Na figura 9 observam-se as características de espectros de diferentes fontes. No primeiro caso, um corpo opaco em qualquer estado físico emite um espectro contínuo. No segundo caso um gás transparente produz linhas espectrais de emissão, sendo a posição das linhas determinada pelos elementos químicos presentes. Por último, se a luz emitida por um corpo opaco passar por um gás transparente frio, linhas de absorção aparecerão no espectro, as quais dependem dos elementos químicos presentes no gás frio.

Na astronomia a espectroscopia nos permite ter uma compreensão melhor sobre os objetos astronômicos que desejamos estudar, desde propriedades cinemáticas, até a idade ou composição química. Ao observar linhas espectrais, podemos identificar deslocamentos para o vermelho ou azul, indicativos do movimento radial desses objetos. Essa informação é fundamental para calcular velocidades radiais e distâncias. Além disso, a espectroscopia permite determinar as propriedades químicas e físicas desses corpos celestes, como temperatura, composição atmosférica e velocidades de rotação.

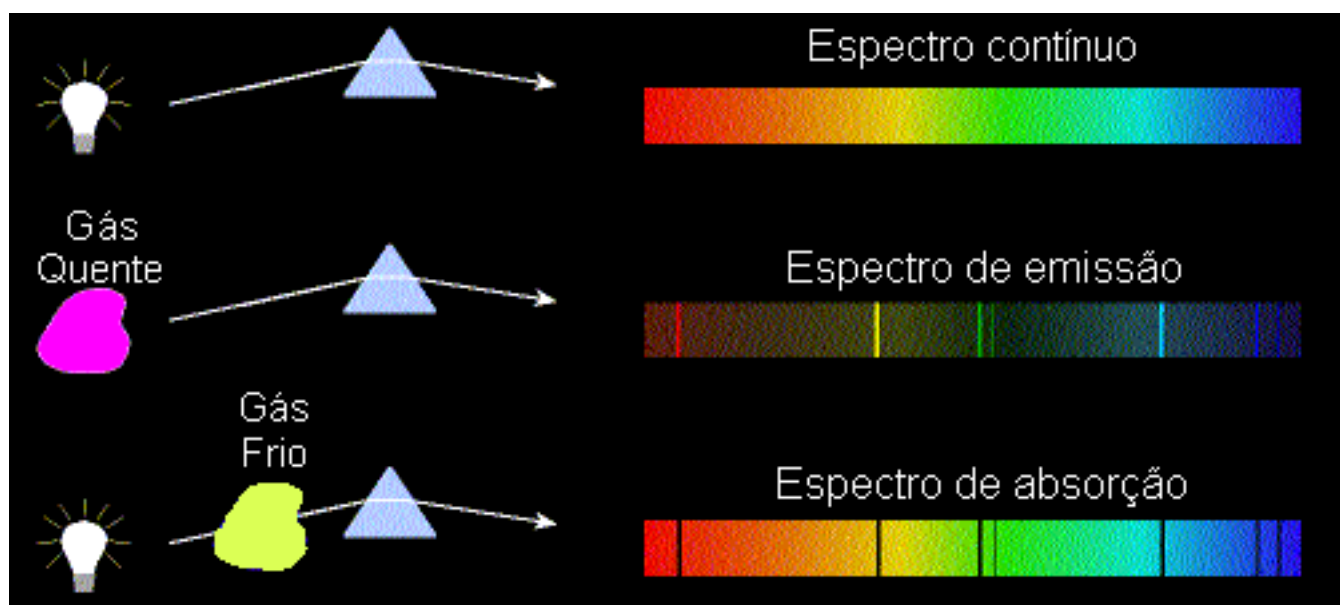


Figura 9 – Figura ilustrativa das Leis de Kirchhoff para diferentes fontes. Imagem retirada de <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula18.htm>.

Devido às inúmeras observações espectroscópicas já realizadas ao longo do último século conseguimos encontrar uma relação de linhas de absorção ou de emissão características para determinados tipos de objetos, incluindo os CSSs. Quando observamos GCs, o índice da linha de absorção Mgb, no comprimento de onda de  $5175 \text{ \AA}$  à  $5195 \text{ \AA}$ , servem como referência para identificar o objeto (PUZIA et al., 2004), mesmo que outras características também devam ser observadas, como tamanho, magnitude e cor. É importante saber identificar as características já proeminentes desses objetos, tanto fotométricas quanto espectroscópicas. A figura 10 mostra um conjunto de espectros de GCs identificados em torno da NGC 5846 (PUZIA et al., 2004), ilustrando características



espectrais proeminentes de aglomerados globulares.

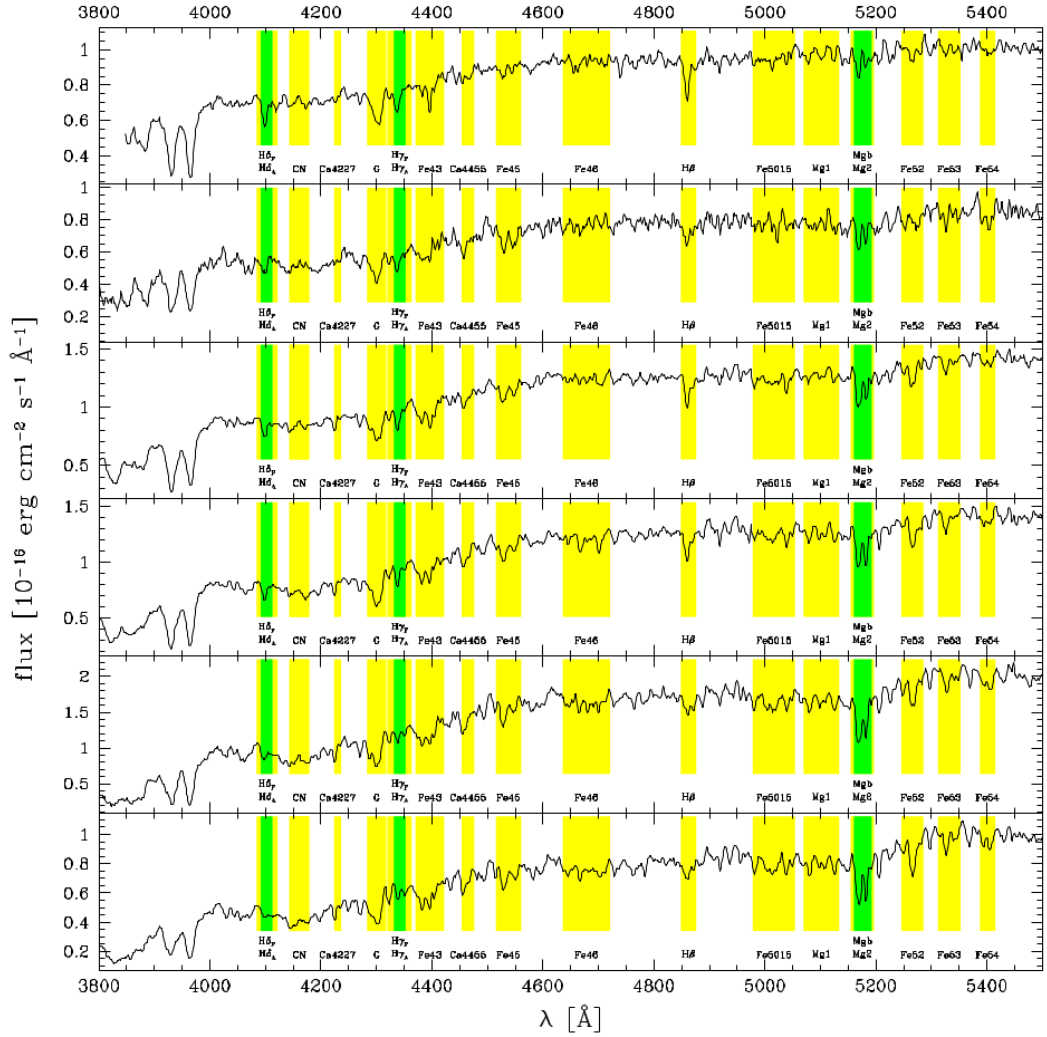


Figura 10 – Espectros de uma amostra de aglomerados globulares em torno de NGC 5846 para demonstrar a influência do aumento da metalicidade no fluxo contínuo na região azul (observe a escala do eixo ordenado que varia). As faixas amarelas representam as linhas proeminentes. Quando duas faixas de índices se sobrepõem, a mais estreita é sombreada com maior intensidade e o rótulo é elevado para indicar a distinção. Imagem retirada de Puzia et al. (2004)

As informações citadas servem como uma boa orientação quando estudamos espectros de CSSs, como no caso das UCDs (ver seção 1.3.2), que são objetos que se encontram em uma classificação de transição entre GCs e galáxias anãs. Então, se observarmos a figura 11, que nos mostra o espectro de uma UCD (cuja imagem é apresentada na figura 12), que pertence ao sistema da galáxia elíptica FCC47 (FAHRION et al., 2019), vemos a linha de absorção do Mg b, ou seja, os espectros possuem semelhanças, e podemos associar isso com os possíveis históricos de formação das próprias UCDs.

Através da análise das linhas características de emissão ou absorção, podemos determinar a distância em que os objetos se encontram a partir do seu *redshift*, além de obter

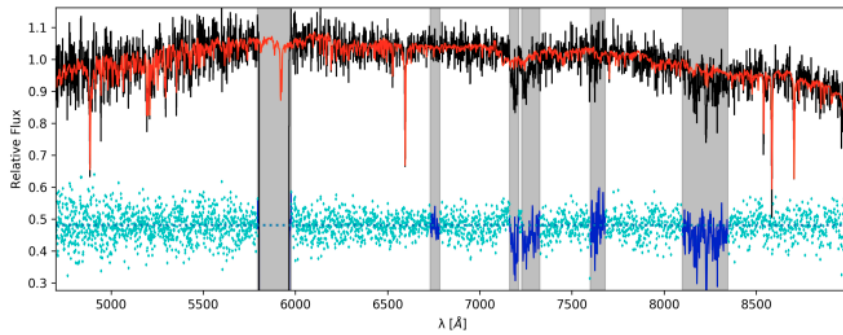


Figura 11 – Espectro de FCC47-UCD1, onde a linha preta representa o espectro observado, e a vermelha o modelo ajustado (FAHRION et al., 2019).

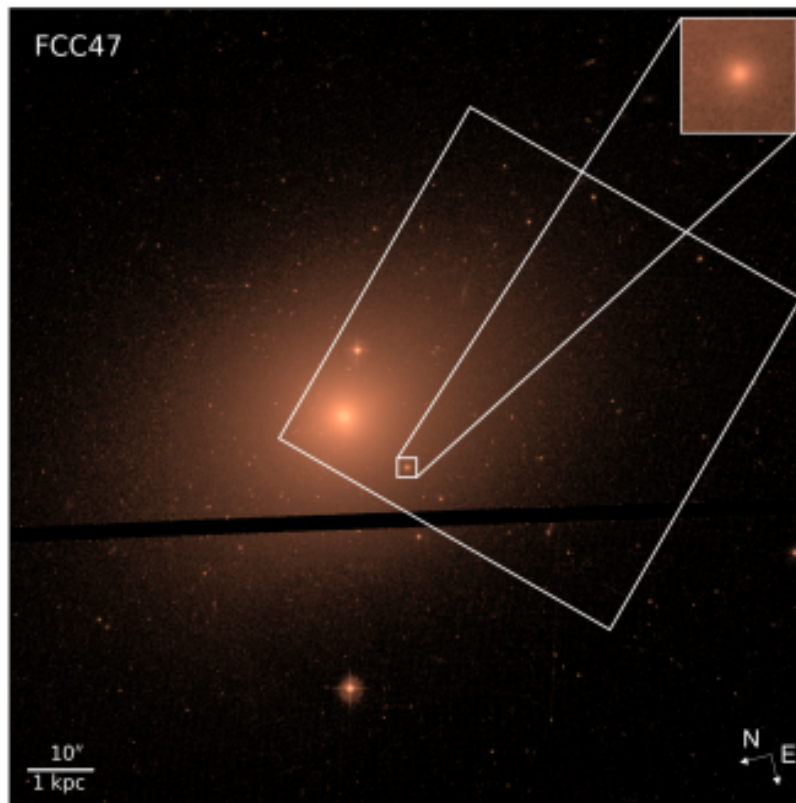


Figura 12 – Imagem de FCC47 no filtro F475W do HST/ACS com cerca de  $11 \times 11$  kpc. A UCD é destacada no painel ampliado. O retângulo branco mostra o apontamento do campo de visão do MUSE no modo de campo amplo correspondendo a  $1'1''$ . Figura retirada do trabalho de Fahrion et al. (2019).

informações sobre sua cinemática e sobre as suas populações estelares, como será detalhado na seção 3.2. Estas informações serão utilizadas para identificar a qual categoria de CSS esses objetos pertencem.

Dessa forma, este trabalho utilizará de espectroscopia para análises dos objetos de interesse, e no capítulo 2 iremos descrever sobre como os nossos dados foram obtidos e selecionados.

## 1.5 Objetivos

Vimos neste capítulo que CSSs dificilmente são encontrados sozinhos nos universo, em sua maioria estão ligados gravitacionalmente a alguma galáxia maior. Estudá-los pode ser uma das chaves para compreendermos o processo histórico de formação da galáxia a qual esses sistemas fazem parte.

Blakeslee e DeGraaff (2008) realizaram observações fotométricas e criaram um catálogo de candidatos a CSS em torno da galáxia ESO 325-G004. Posteriormente, foram realizadas observações espectroscópicas com o Gemini/GMOS de um objetos selecionados a partir deste catálogo, a pedido do colaborador J. Blakeslee. Neste trabalho, analisaremos os espectros desta amostra de candidatos a CSS identificados em torno da galáxia ESO 325-G004. Nosso primeiro objetivo é confirmar se esses candidatos a CSS de fato fazem parte do sistema da ESO 325-G004.

Nos casos em que se confirmarem que os objetos encontram-se no mesmo *redshift* da galáxia hospedeira, iremos determinar suas propriedades físicas e cinemáticas, como idade, metalicidade, razão massa-luminosidade e velocidade radial. Essas informações serão utilizadas para determinar em qual categoria de CSS (GCs ou UCDs) esses objetos pertencem. Isso permitirá melhorar a nossa compreensão sobre a ESO 325-G004, podendo ser úteis para determinarmos seu histórico de formação, ou para aferirmos a massa da galáxia hospedeira a partir da sua dinâmica.

No capítulo 2, detalharemos como os dados foram coletados, incluindo a redução dos dados e os critérios de seleção aplicados. Em seguida, no capítulo 3, descreveremos as ferramentas utilizadas para tratar os dados e discutiremos os critérios adotados na análise dos mesmos. No capítulo 4, apresentaremos os resultados obtidos e discutiremos se eles estão de acordo com as expectativas iniciais. No capítulo 5, apresentaremos as conclusões deste trabalho e as suas perspectivas futuras.



## 2 Dados

Neste capítulo descreveremos os dados utilizados neste trabalho. Estudos prévios sobre CSSs em torno da galáxia ESO 325-G004 foram realizados por DeGraaff (2011) e Blakeslee e DeGraaff (2008), os quais iremos nos referir neste trabalho por BG2008 e G2011, respectivamente. Nestes estudos foram utilizados somente dados fotométricos, obtidos com o Wide Field Channel (WFC) da ACS do HST. Na seção 2.1 apresentaremos um resumo sobre os dados fotométricos obtidos nestes estudos prévios e sobre a amostra de candidatos a CSS obtida por BG2008, que serviu de base para a seleção dos alvos para os quais foram obtidas observações espectroscópicas. Na seção 2.2 apresentaremos os novos dados espectroscópicos de uma amostra de candidatos a CSS que foram analisados nesta dissertação.

### 2.1 Dados do Telescópio Espacial Hubble

Utilizando a ACS/WFC do HST, o campo da galáxia ESO 325-G004 foi observado com os filtros F475W, F625W e F814W por BG2008 e G2011. Nesta dissertação, adotaremos a seguinte notação para as magnitudes advindas dos filtros do HST:  $g_{475}$ ,  $r_{625}$  e  $I_{814}$ , respectivamente. Inicialmente, em janeiro de 2005, observações foram realizadas com os filtros F814W e F475W, com tempos variados, onde 22 exposições somaram 18882 s para o primeiro filtro, e 3 exposições de 376 s no segundo filtro totalizando 1128 s, como parte do programa HST GO Program 10429 (BLAKESLEE, 2007).

Em fevereiro de 2006, como parte do programa HST DD Program 10710 para uma imagem de divulgação pública do Hubble Heritage<sup>1</sup>, foram feitas imagens do campo da galáxia ESO 325-G004, com 6 exposições adicionais no filtro F475W, e observações com o filtro F625W. Os tempos de exposição totais, após os dois programas foram: 5901 s no filtro F475W, 4650 s no filtro F625W e 18882 s no filtro F814W. Para obter informações mais detalhadas sobre as observações utilizando o HST e respectivas reduções de dados, recomendamos consultar BG2008 e o capítulo 3 de G2011.

A calibração fotométrica foi realizada utilizando como referência a estrela Vega para cada filtro da ACS/WFC. A correção por extinção galáctica foi aplicada usando  $E(B - V) = 0.0605$  mag. Essa correção é essencial para compensar os efeitos de avermelhamento da luz devido à presença de poeira interestelar em nossa linha de visão. Para a detecção das fontes luminosas de interesse, foi utilizado o software SExtractor.

Para a seleção dos candidatos a GCs/UCDs, foi utilizado um critério de cor ( $g_{475} - I_{814}$ ), com o intervalo de seleção de  $1.3 < (g_{475} - I_{814}) < 2.0$ , correspondendo a  $0.85 < V - I <$

<sup>1</sup> <http://heritage.stsci.edu/2007/08/index.html>

1.35. Além disso, os objetos deveriam apresentar  $0.4 < (r_{625} - I_{814}) < 0.9$ .

A figura 13 mostra seleção de cores usada para identificar UCDs e GCs, removendo a contaminação de galáxias de fundo e estrelas. Os objetos compactos incluem GCs, UCDs, galáxias distantes e estrelas. Para selecionar objetos compactos, foi feito um corte em tamanho, entre 10 – 100 pc, baseada no ajuste de fotometria superficial. A comparação entre objetos estendidos e compactos é mostrada na figura. A seleção de cores indicada pelas linhas tracejadas, define a região onde estão os candidatos a CSS.

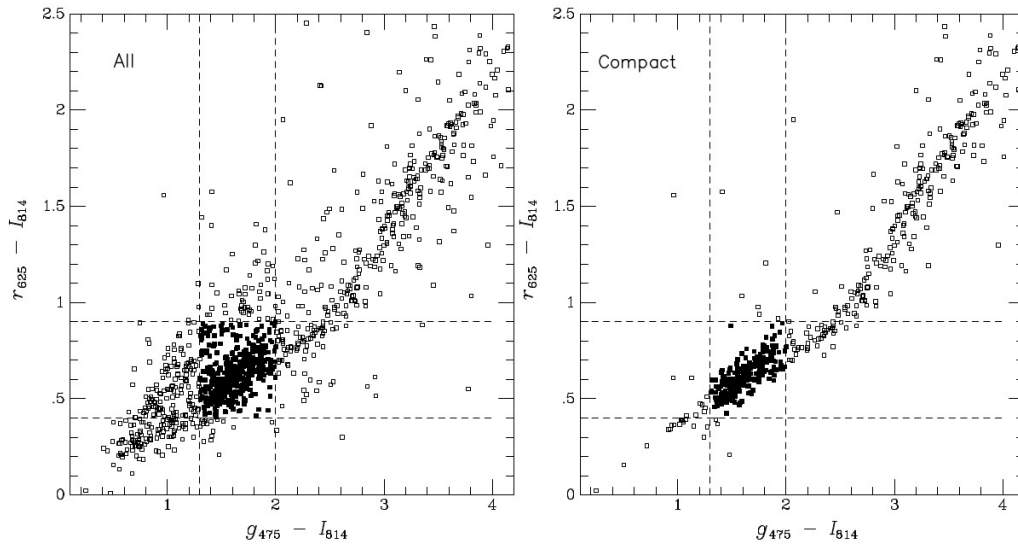


Figura 13 – Diagrama cor-cor que mostra a distribuição de objetos em torno da galáxia ESO 325-G004. A seleção de cores é usada para identificar UCDs e GCs, removendo a contaminação de galáxias de fundo e estrelas. Os objetos compactos incluem GCs, UCDs, galáxias distantes e contaminação estelar. A seleção de tamanho foi baseada em ajuste de fotometria superficial, e a comparação entre objetos estendidos e compactos é mostrada. As linhas tracejadas definem a região onde estão os candidatos a CSS. Imagem retirada de G2011.

Com base nos dados do HST e nos critérios acima descritos, foram catalogados no total 43 candidatos a GCs, 15 possíveis UCDs e 26 outras galáxias compactas anãs. Contudo, esses dados não proporcionam distinção clara entre GCs e UCDs. Como ilustrado na figura 7, somente informações de cor ou raio não são adequados para determinar diferenças substanciais entre eles. Para isso, é necessário obter confirmação espectroscópica. A seguir, descreveremos os dados espectroscópicos obtidos com o telescópio Gemini e utilizados para investigar e classificar estes objetos.

## 2.2 Dados do Observatório Gemini

O Observatório Gemini possui dois telescópios idênticos chamados Gemini Norte (localizado no Havaí, EUA) e Gemini Sul (localizado no Chile). A utilização desse telescópio

advém de sua grande capacidade de coleta de luz, pois possui um espelho de 8 metros de diâmetro, além de uma excelente capacidade de utilização em uma ampla faixa de comprimentos de onda da luz, desde a luz visível ao infravermelho próximo. O Gemini

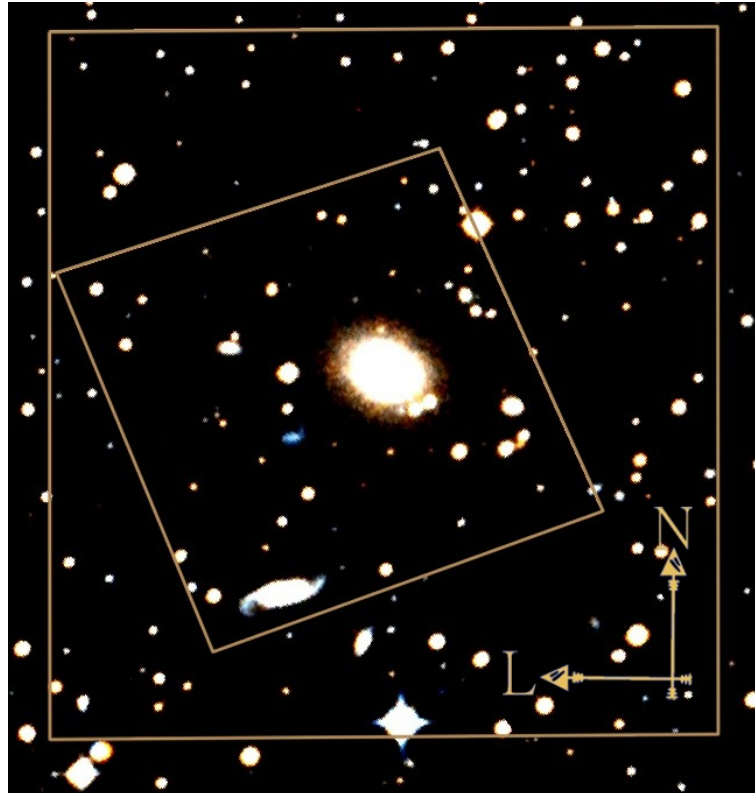


Figura 14 – A figura mostra a região da galáxia ESO 325-G004, onde o campo mais ao centro é o campo de visão observado com o HST ACS/WFC, e o campo mais externo corresponde ao campo de visão observado pelo GMOS.

Multi-Object Spectrograph (GMOS) foi utilizado neste trabalho pela sua capacidade de realizar espectroscopia óptica de múltiplos objetos simultaneamente. Além disso, possui um campo de visão de  $5.5' \times 5.5'$ , proporcionando maior campo de visão em comparação com a ACS/WFC, que possui um campo de visão de aproximadamente de  $3.3' \times 3.3'$ , como podemos ver na figura 14.

Os dados foram adquiridos a partir do programa GS-2009A-Q-24, cujo investigador principal foi *John Blakeslee*. Inicialmente foram obtidas imagens com o GMOS usando os filtros *g*-G0325, *r*-G0327 e *i*-G0326, que, ao decorrer dessa dissertação, serão denominados como (*g*, *r* e *i*). O tempo de exposição foi de 4 x 120s, totalizando 480 segundos para os filtros nas bandas *r*-G0327 e *i*-G0326, e 4 x 240s, totalizando 960s segundos na banda *g*-G0325, totalizando 0.9 horas, o equivalente a 54 minutos com as trocas de filtros e leituras para a imagem. A espectroscopia foi realizada em duas máscaras, com 12 exposições de 1800s, 12 leituras, onde o tempo total, com a configuração inicial, foi de 8,05 horas para cada máscara ou 16,1 horas para ambas. Usando as imagens e os mesmos critérios de seleção baseados em cor aplicados aos dados do HST (ver figura 13), foram selecionados

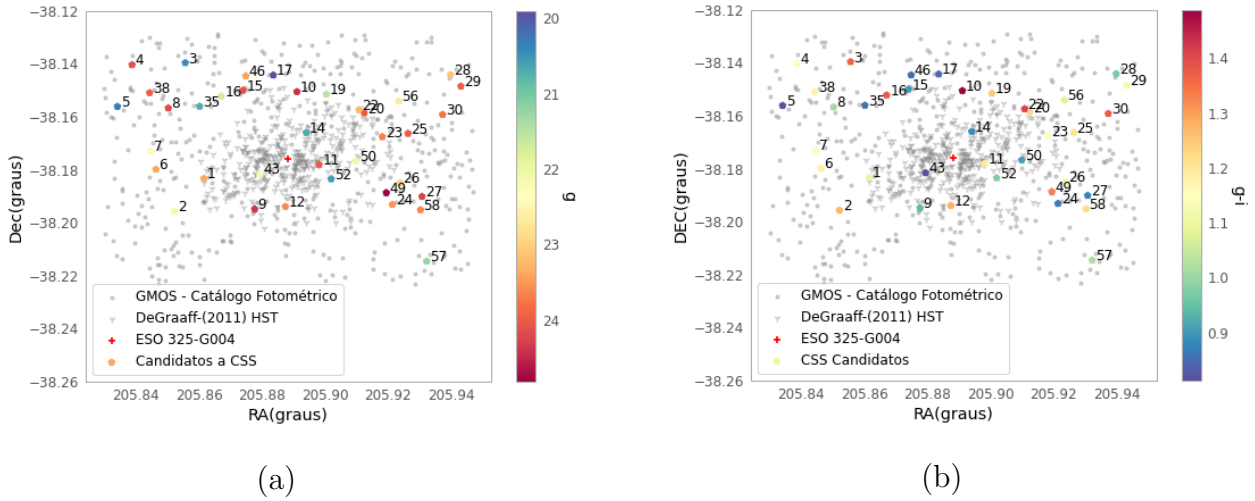


Figura 15 – Distribuição espacial dos objetos observados, Ascensão Reta (RA) vs. Declinação (Dec). A barra de cor indica a magnitude na banda  $g$  (painel esquerdo) e cor  $g - i$  (painel direito). A cruz vermelha representa a localização do centro da galáxia ESO 325-G004, os círculos são todas as fontes detectadas pelo GMOS, os triângulos em cinza virados pra baixo são todos os pontos observados com o HST por DeGraaff (2011).

novos candidatos a CSS na área observada pelo GMOS.

Duas máscaras foram confeccionadas, onde múltiplas fendas são perfuradas nas posições dos objetos de interesse. Foram obtidos espectros de 60 objetos candidatos a GCs/UCDs por meio destas máscaras. Cada máscara foi observada em dois comprimentos de onda centrais distintos, 5200 e 5250 Å. No entanto, esses valores não correspondem aos comprimentos de onda central dos espectros de cada objeto, uma vez que este depende da posição da fenda correspondente ao objeto na máscara.

Os nossos objetos foram observados em uma faixa espectral entre 3800–6500 Å, que inclui a quebra em 4000 Å, com a grade B600\_G5303. Para as fendas de 1", a largura espectral FWHM<sup>2</sup> é de aproximadamente 6 Å.

A redução de dados foi conduzida pelo colaborador *Luis Gabriel Dahmer Hahn* utilizando o pacote Gemini para o IRAF. Para uma compreensão mais aprofundada, é altamente recomendável o guia de redução para este instrumento<sup>3</sup> Em termos básicos, a redução envolve a criação de arquivos-mestre de *bias*, *dark* e *flat*, com subsequente aplicação dessas correções nos arquivos da estrela padrão, objetos de ciência e *arcs* (uma observações de uma lâmpada de gás quente cujo espectro é bem conhecido). Posteriormente, é realizada a calibração em comprimento de onda com base nas linhas de emissão do espectro da lâmpada de CuAr. Esta calibração é aplicada aos espectros da estrela padrão e dos objetos de ciência. Por fim, a partir do espectro da estrela padrão, é encon-

<sup>2</sup> FWHM (em inglês, Full Width at Half Maximum, que pode ser traduzido como “largura total à meia altura”) é uma medida de uma linha espectral.

<sup>3</sup> acessível em <https://noirlab.edu/science/programs/csdc/usngo/gmos-cookbook/>.



trada a função de sensibilidade do instrumento para a calibração em fluxo, que é aplicada aos espectros dos objetos de ciência.

Após a redução dos dados, combinamos os arquivos correspondentes ao mesmos objetos, mas com diferentes comprimentos de onda centrais, fazendo a média entre eles. Esse passo foi necessário para aumentar a razão sinal-ruído ( $S/N$ ) e cobrir regiões sem dados entre os CCDs.

A figura 15, apresenta a distribuição espacial dos objetos de interesse, cujos pontos foram coloridos de acordo com sua magnitude na banda  $g$  do GMOS no painel à esquerda. No painel à direita desta figura, vemos a mesma distribuição espacial, agora com os pontos coloridos de acordo com sua cor  $g - i$ .

Essa constitui a amostra inicial selecionada para este trabalho. No capítulo 3 serão apresentados os critérios de seleção aplicados aos 60 objetos da amostra, para determinar quais são possíveis CSSs, e os métodos utilizados para estudar e classificar esses candidatos.



# 3 Metodologia

Esse capítulo tratará sobre a metodologia utilizada neste trabalho. Inicialmente descreveremos os critérios adotados para a obtenção da amostra final a ser analisada. Após, faremos uma introdução ao método utilizado para obter informações de velocidade radial, metalicidade e idade dos nossos candidatos a CSS.

## 3.1 Seleção Amostral

Os 60 candidatos a CSS observados com o Gemini/GMOS foram numerados em ordem crescente, sendo que os da máscara de comprimento de onda central de 5200 Å foram designados de 1 a 30, e os da máscara com comprimento de onda central de 5500 Å foram designados de 31 a 60. Essa numeração será mantida até o final das análises.

Identificamos 2 objetos na máscara centrada em 5200 Å que também estavam presentes na outra máscara. Combinamos os espectros repetidos com seus respectivos pares, calculando a média entre eles, resultando em um total de 58 objetos. Em seguida, removemos da amostra objetos espúrios, como galáxias ou estrelas. Este procedimento foi realizado em duas etapas. A primeira etapa consistiu na inspeção visual com o auxílio das imagens do Gemini para identificar os objetos que não se assemelham a GCs/UCDs, que foram incluídos em nossas máscaras por possuírem cores similares a CSSs. Durante essa etapa, removemos da amostra objetos que claramente eram galáxias e assim ficamos com 42 objetos. Na segunda etapa, conduzimos uma pesquisa no catálogo GAIA<sup>1</sup> e identificamos que 2 objetos da nossa amostra eram estrelas. Além disso, também conduzimos uma busca na base de dados do NED<sup>2</sup>, identificando mais 3 objetos classificados como galáxias irregulares e galáxias S0 entre os objetos da nossa amostra. Ao final deste processo, permaneceram 37 objetos em nossa amostra.

Na figura 16 os pontos laranja são os alvos observados com o GMOS, os triângulos verdes representam todos os candidatos a CSS observados com o HST, e os nossos candidatos são os triângulos invertidos em azul. Nossos objetos possuem cores de acordo com a seleção feita por DeGraaff (2011).

O cálculo do  $S/N$  dos espectros foi realizado pela média do fluxo no intervalo de comprimento de onda entre 5000Å e 5500Å. Esse critério foi escolhido por utilizar apenas o contínuo do nosso espectro, garantindo que as bordas dos espectros, que poderiam ter irregularidades, não afetassem o resultado.

---

<sup>1</sup> <https://sci.esa.int/web/gaia>

<sup>2</sup> <https://ned.ipac.caltech.edu/>

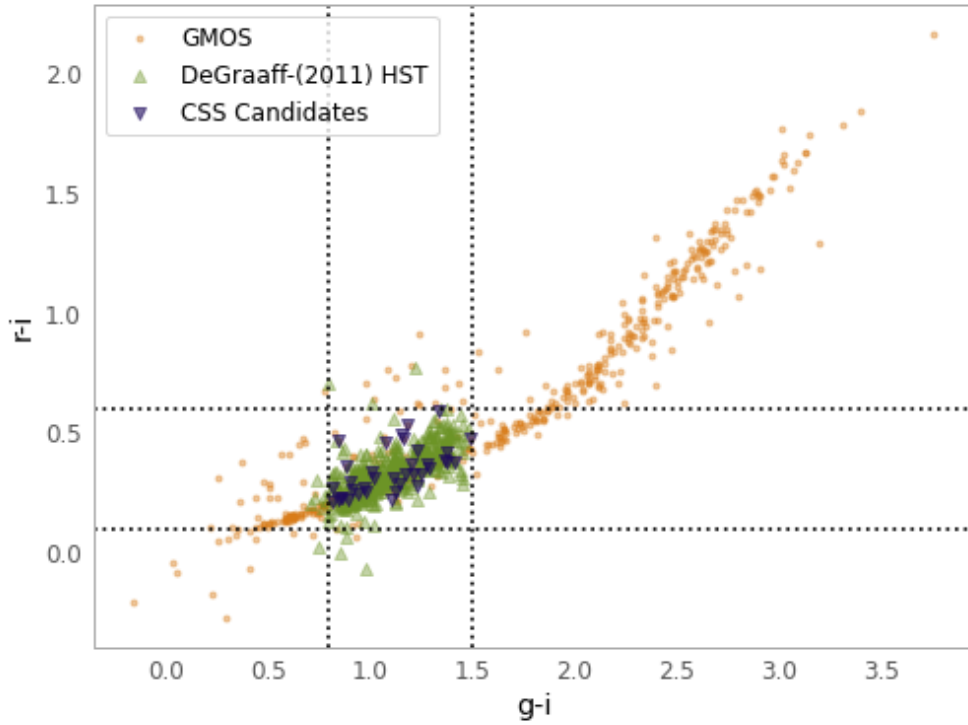


Figura 16 – Figura cor-cor, onde o eixo x representa a cor  $g - i$ , e o eixo y representa a cor  $r - i$ . Os retângulos verdes são todos as fontes catalogado por DeGraaff (2011) usando o HST/ACS, os pontos laranjas representam todos os pontos observados usando o GMOS, os triângulos roxos são os 37 candidatos selecionados.

A tabela 1 nos mostra o identificador (OBJ) de cada objeto, as coordenadas de ascensão reta (RA) e declinação (Dec), a magnitude na banda  $g$ , as cores  $r - i$  e  $g - i$ , e também os valores do  $S/N$  medidos.

## 3.2 Penalized Pixel-Fitting (pPXF)

Para medir as propriedades cinemáticas e inferir as idades e metalicidades dos nossos candidatos a CSS, utilizamos o penalized pixel-fitting (PPXF<sup>3</sup>), método implementado em linguagem Python por Cappellari e Emsellem (2004).

Para inferir grandezas físicas relacionadas à cinemática dos nossos objetos de interesse, precisamos utilizar a distribuição da Velocidade ao longo da linha visada, do inglês *line-of-sight velocity distribution* (LOSVD), que descreve a velocidade ao longo da linha visada das estrelas com velocidade no intervalo  $[v, v + dv]$ . A ideia do PPXF é então recuperar a LOSVD parametrizando-a por um polinômio de Gauss-Hermite em um espaço de pixels,

<sup>3</sup> <https://www-astro.physics.ox.ac.uk/~cappellari/software/>

OBJ	RA	DEC	$g$	$r - i$	$g - i$	$S/N$
1	205.86159	-38.18332	23.53	0.227	1.099	12.70
2	205.85217	-38.19569	22.24	0.372	1.272	29.60
3	205.85568	-38.13960	20.58	0.388	1.364	16.74
4	205.83880	-38.14037	24.26	0.478	1.160	2.17
5	205.83417	-38.15611	20.46	0.217	0.812	53.50
6	205.84638	-38.17986	23.53	0.534	1.180	10.08
7	205.84464	-38.17297	22.58	0.290	1.140	20.96
8	205.85031	-38.15670	24.34	0.337	1.009	5.42
9	205.87770	-38.19486	24.53	0.252	0.940	4.31
10	205.89109	-38.15051	24.57	0.477	1.490	6.21
11	205.89812	-38.17806	24.16	0.370	1.190	7.34
12	205.88744	-38.19387	23.75	0.354	1.280	14.74
14	205.89405	-38.16593	20.80	0.223	0.880	66.09
15	205.87401	-38.14999	24.28	0.295	0.890	3.53
16	205.86712	-38.15217	21.87	0.383	1.370	21.88
17	205.88361	-38.14426	20.04	0.223	0.840	46.54
19	205.90045	-38.15150	21.66	0.332	1.250	21.22
20	205.91244	-38.15855	24.15	0.284	1.230	5.41
22	205.91078	-38.15739	23.37	0.378	1.410	10.04
23	205.91817	-38.16754	23.82	0.497	1.150	7.70
24	205.92136	-38.19314	23.67	0.234	0.860	10.15
25	205.92631	-38.16628	24.14	0.328	1.210	6.84
26	205.92376	-38.18498	23.096	0.312	1.109	18.86
27	205.93075	-38.19010	24.411	0.365	0.876	7.27
28	205.93980	-38.14411	23.262	0.276	0.970	4.72
29	205.94310	-38.14845	24.094	0.255	1.123	3.38
30	205.93728	-38.15916	23.924	0.419	1.377	6.13
35	205.86024	-38.15603	20.836	0.235	0.851	53.60
38	205.84439	-38.15091	24.088	0.334	1.174	5.08
43	205.87944	-38.18151	22.332	0.272	0.812	33.95
46	205.87488	-38.14458	23.573	0.473	0.845	3.81
49	205.91944	-38.18868	24.958	0.590	1.332	4.45
50	205.90989	-38.17669	22.241	0.261	0.905	25.78
52	205.90194	-38.18345	20.684	0.255	0.977	42.81
56	205.92339	-38.15402	22.842	0.459	1.077	10.62
57	205.93221	-38.21453	21.372	0.312	1.019	72.74
58	205.93027	-38.19514	23.771	0.428	1.223	7.34

Tabela 1 – Tabela com as coordenadas, magnitude na banda  $g$ , cores  $r - i$  e  $g - i$  e  $S/N$  dos espectros dos 37 objetos da nossa amostra.

ao invés de utilizar o espaço de Fourier.

Observações de objetos fora da Via Láctea geralmente não permitem resolver estrelas individualmente, de modo que os espectros observados possuem contribuição de diferentes estrelas. Por isso, podemos comparar tais espectros com modelos simples de populações estelares, as SSP. Essa comparação é feita no espaço de pixels, em vez de uma comparação

no espaço de Fourier (CAPPELLARI; EMSELLEM, 2004; RIX; WHITE, 1992). Assim, podemos:

- Mascaram pixels com problemas, como linhas mal reduzidas ou mal subtraídas de céu ou linhas ruidosas devido a outros motivos.
- Ajustar simultaneamente a cinemática estelar/do gás e a população estelar.

Se considerarmos que o espectro observado de um objeto estelar é a soma ponderada dos espectros estelares individuais convoluídos com sua LOSVD, assumindo que a galáxia é composta apenas por suas populações estelares, a recuperação da LOSVD se torna um problema de deconvolução do espectro da galáxia. Para isso, utilizamos um modelo do espectro  $G_{\text{mod}}(x)$  da galáxia, obtido através da convolução dos *templates* de espectros estelares  $T(x)$  com a LOSVD parametrizada. Tanto o espectro da galáxia quanto os espectros dos modelos são re-amostrados em comprimento de onda em uma escala logarítmica. Além disso, o PPXF pode incluir polinômios aditivos e/ou multiplicativos na hora do ajuste, dependendo da necessidade (CAPPELLARI, 2016; MAREL; FRANX, 1993; GERHARD, 1993).

O PPXF aproxima o espectro observado da galáxia utilizando a seguinte parametrização (CAPPELLARI, 2016):

$$G_{\text{mod}}(x) = \sum_{n=1}^N w_n \left\{ [T_n * \mathcal{L}_n(cx)] \sum_{k=1}^K a_k \mathcal{P}_k(x) \right\} + \sum_{l=1}^L b_l \mathcal{P}_l(x) + \sum_{j=1}^J c_j \mathcal{S}_j(x), \quad (3.1)$$

onde  $x = \ln(\lambda)$  é o logaritmo natural do comprimento de onda, o  $\mathcal{L}_n$  é a LOSVD que pode variar dependendo do número  $N$  de *templates* adotados.  $T_n(x)$  são um conjunto de  $N$  templates,  $\mathcal{P}_k$  e  $\mathcal{P}_l$  são polinômios ortogonais multiplicativos ou aditivos de grau  $k$  e  $l$ , respectivamente, com  $a_k$  e  $b_l$  como seus coeficientes.  $\mathcal{S}_j(x)$  é um conjunto de *templates* do céu. O símbolo  $*$  denota a convolução. E  $w_n$  e  $c_j$  são os coeficientes ponderados pela luminosidade.

Os polinômios aditivos podem ser incorporados para evitar inconsistências entre o espectro da galáxia e os modelos adotados, enquanto os polinômios multiplicativos podem corrigir a calibração espectral e garantir que o ajuste não seja afetado pelo avermelhamento causado por poeira cósmica, eliminando a necessidade de adotar uma curva específica de avermelhamento. Na equação 3.1, os limites  $K$ ,  $L$  e  $J$  dependem do número de modelos utilizados e do grau dos polinômios (aditivos ou multiplicativos) escolhidos, que são definidos pelo usuário.

O PPXF parametriza o LOSVD, tanto para componentes estelares, quando para componentes de gás, utilizando um polinômio de Gauss-Hermite na seguinte forma (CAPPELLARI, 2016):

$$\mathcal{L}(x) = \frac{\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[ 1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right], \quad (3.2)$$

onde  $y = \frac{(v-V)}{\sigma}$ ,  $V$  é a velocidade média e  $\sigma$  é a dispersão de velocidade. Além disso,  $H_m$  são os polinômios de Hermite, com  $M$  sendo a ordem dos momentos.

O código penaliza soluções não gaussianas, uma vez que a LOSVD das galáxias geralmente é bem aproximada por uma distribuição gaussiana (DEKEL et al., 2005). Então, o  $\chi^2$ , que mede o quão bom é o ajuste, pode ser escrito da forma:

$$\chi_p^2 = \chi^2 + \alpha \mathcal{P}, \quad (3.3)$$

onde  $\mathcal{P}$  é uma função de penalidade, que penaliza soluções não gaussianas com base na divergência da LOSVD em relação a uma forma gaussiana, enquanto  $\alpha$  é uma penalidade ajustável que depende da qualidade dos dados. O procedimento também leva em conta a função de espalhamento de linha do instrumento, ou seja, a capacidade do instrumento de resolver duas linhas espectrais vizinhas.

Para o estudo do histórico de formação estelar, o PPXF utiliza a seguinte equação (CAPPELLARI, 2016):

$$G_{\text{mod}}(\lambda) = \int_{t=0}^{t=T} \text{SSP}_{\lambda}(t, Z) \text{SFR}(T-t) dt, \quad (3.4)$$

onde Taxa de Formação Estelar, do inglês *Star Formation Rate* (SFR) é a taxa de formação estelar,  $\text{SSP}_{\lambda}$  é uma população estelar única por unidade de massa, com idade  $t$  e metalicidade  $Z$ , enquanto  $T$  é a idade do Universo no *redshift* da galáxia. O PPXF utiliza a equação 3.4 de forma mais generalizada para estudar a distribuição de outros parâmetros, como metalicidade, enriquecimento-alfa ou Função de massa inicial, do inglês *Initial Mass Function* (IMF), além da SFR.

A recuperação da  $\text{SFR}(t)$  a partir dos dados observados é um exemplo onde esta técnica enfrenta dificuldades devido a várias soluções possíveis e à impossibilidade de encontrar uma solução única sem suposições adicionais. Uma abordagem comum para lidar com esse problema é através da regularização, que pode ser vista como um método para reduzir as variações de alta frequência na solução, a menos que sejam essenciais para descrever os dados, ou para equilibrar a qualidade do ajuste com o ruído na solução. Em outras palavras, a regularização permite selecionar uma solução suave entre várias soluções que são igualmente compatíveis com os dados, mas podem apresentar degenerações. A regularização não impõe uma solução obrigatoriamente suave. Na verdade, a solução pode ser tão suave ou não suave quanto necessário, dependendo das exigências dos dados. Por exemplo, se os dados indicarem várias explosões agudas de formação estelar, a solução poderá acomodá-las sem necessariamente ser suave, desde que seja consistente com os dados.

### 3.2.1 Cinemática

Para executar o código do PPXF, é necessário selecionar um conjunto de modelos de SSP. Neste trabalho, empregamos o subconjunto da biblioteca de SSP de Vazdekis et

al. (2010), conhecido como modelo MILES. Essa biblioteca contém espectros na faixa de 3525 a 7500 Å e possui uma resolução espectral de  $\text{FWHM} = 2.51 \text{ \AA}$ .

As informações derivadas do pPXF não se limitam à cinemática, temos também a informações do  $\chi^2$ . Além disso, é possível determinar *redshift* dos objetos, que constitui um dos objetivos deste trabalho. Para obtenção de resultados da cinemática foram utilizados polinômios aditivos de grau 20, e nenhum polinômio multiplicativo para cada um dos ajustes, pelos motivos explicados anteriormente.

Ao realizar os ajustes de cinemática com o pPXF, adotamos a faixa de comprimento de onda ( $\lambda$ ) entre 4250 Å e 6000 Å para a maioria dos objetos, de forma a excluir as bordas dos espectros, que em geral apresentam ruídos maiores. Apenas um dos nossos objetos da amostra foi utilizado uma faixa diferente, pois, no caso em específico, o início de sua faixa espectral não era coincidente com os outros; o valor utilizado para este objeto foi entre 4500 Å e 6000 Å.

Máscaras foram aplicadas em regiões do espectro com maior ruído, onde linhas do céu mal subtraídas são evidentes. Na figura 17 podemos ver o resultado de linhas mal subtraídas no espectro de um objeto da amostra. As regiões em torno dessas linhas foram devidamente mascaradas durante o ajuste realizado com o pPXF (ver figura 19 na seção 4.1).

Para calcular o erro das velocidades, empregamos o método de Monte Carlo, e nesse trabalho utilizamos 200 re-amostragens. Discutiremos os resultados individuais e de forma geral dos valores encontrados no capítulo 4.

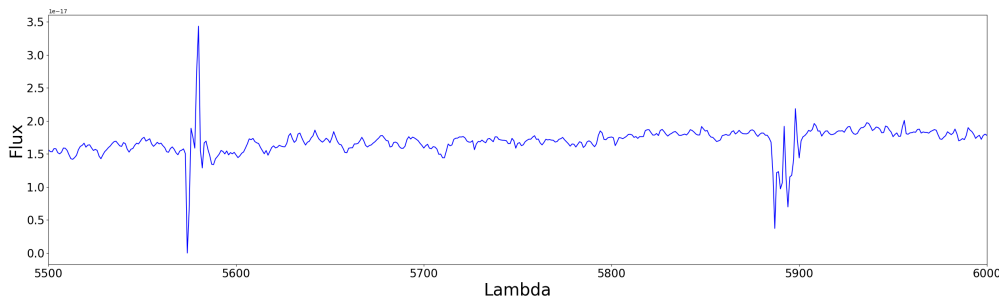


Figura 17 – A figura representa um zoom no espectro do objeto 16, dentro da faixa de comprimento de onda entre 5500 – 6000 Å.

### 3.2.2 Síntese de populações estelares

Como mencionado na seção 3.2, o algoritmo utiliza o peso da contribuição da luz para extrair informações da síntese de populações estelares, visando obter valores de metalicidade e idade. Se faz necessário executar o código de maneira diferente do caso para a cinemática.



Spiniello et al. (2021) investigaram a influência do aumento e da diminuição das ordens dos polinômios no pPXF, tanto para a cinemática quanto para a síntese de populações estelares, e concluíram que polinômios multiplicativos acima do grau 10 podem enviesar as informações de idade, tornando-as mais antigas. Desta forma, utilizamos somente polinômios multiplicativos de grau 10 para a síntese de populações estelares dos objetos da nossa amostra final.

Nessa etapa do processo, aplicamos um filtro gaussiano com dispersão de  $\sigma = 2 \text{ \AA}$ , visando reduzir o ruído dos nossos espectros e consequentemente aumentar seu  $S/N$ . Como a largura das linhas não é mais um fator importante, utilizaremos esse novo fluxo, para fins de compreender o histórico de formação estelar dos nossos CSSs.

Para obter resultados mais robustos, empregamos o método de Monte Carlo para aumentar a confiança dos valores obtidos. Implementamos uma rotina de 200 iterações, assim como feito para calcular as incertezas na seção 3.2.1, e para calcular a idade, metalicidade, e a razão massa-luminosidade.

As máscaras, usadas para excluir pixels ruins durante o ajuste da cinemática, foram mantidas a fim de preservar o mesmo critério dentro do nosso estudo. No capítulo 4, utilizaremos as informações obtidas com o pPXF a fim de compreender se os nossos candidatos possuem características como idade e metalicidade condizentes com GCs/UCDs.



## 4 Resultados

Neste capítulo serão debatidos os critérios para a seleção da amostra final, baseados em  $S/N$  e linhas proeminentes características de GCs/UCDs. Trataremos dos resultados obtidos para cinemática e síntese de populações estelares utilizando o PPXF, como foi explicado no capítulo 3. Na seção 4.4 discutimos a natureza dos objetos brilhantes e compactos no entorno da galáxia ESO 325-G004. Na seção 4.5 abordaremos os trabalhos de BG2008 e G2011, relacionando objetos em comum com a nossa amostra.

### 4.1 Amostra Final

Na nossa amostra inicial de 37 candidatos a CSS, apresentada na tabela 1, observamos que alguns deles possuem  $S/N \leq 5$ . Estes foram excluídos da amostra final devido ao alto nível de ruído. Posteriormente, examinamos visualmente os espectros de cada um dos objetos restantes, descartando aqueles que claramente não se assemelham ao esperado para GCs e UCDs, através de linhas de absorção do Mgb ( $5175 \text{ \AA}$  à  $5195 \text{ \AA}$ ), como os da figura 10.

Após aplicar o corte com base no  $S/N$  e realizar a análise visual dos espectros, obtivemos uma amostra final de 14 candidatos a CSS, cujo diagrama cor-magnitude é exibido na figura 18.

Os espectros dos 14 candidatos a CSS que compõem a amostra final são apresentados na figura 19. A faixa de comprimento de onda abrange de  $3500 \text{ \AA}$  a  $7500 \text{ \AA}$ , sendo possível identificar uma região com ruído próximo a  $5500 \text{ \AA}$  na maioria dos espectros. Essa região corresponde às linhas de céu que foram mal subtraídas, as quais são mascaradas no processo de ajustes a ser realizados com o PPXF.

### 4.2 Cinemática

Após o ajuste realizado com o PPXF com a configuração descrita na seção 3.2.1, obtivemos as velocidades radiais ( $V_r$ ) dos nossos objetos. As figuras 20 e 21, mostram o resultado dos ajustes realizado pelo PPXF nos espectros dos 14 objetos da nossa amostra final. Na primeira figura estão apresentados, em ordem, os objetos 02, 03, 05, 12, 14, 16 e 17, enquanto na segunda figura estão os objetos 19, 22, 35, 38, 43, 52 e 57. A linha preta representa o espectro do nosso objeto e a linha vermelha representa o modelo ajustado. As áreas sombreadas em cinza indicam as regiões mascaradas, enquanto as linhas verticais verdes são as linhas de referência mencionadas anteriormente.

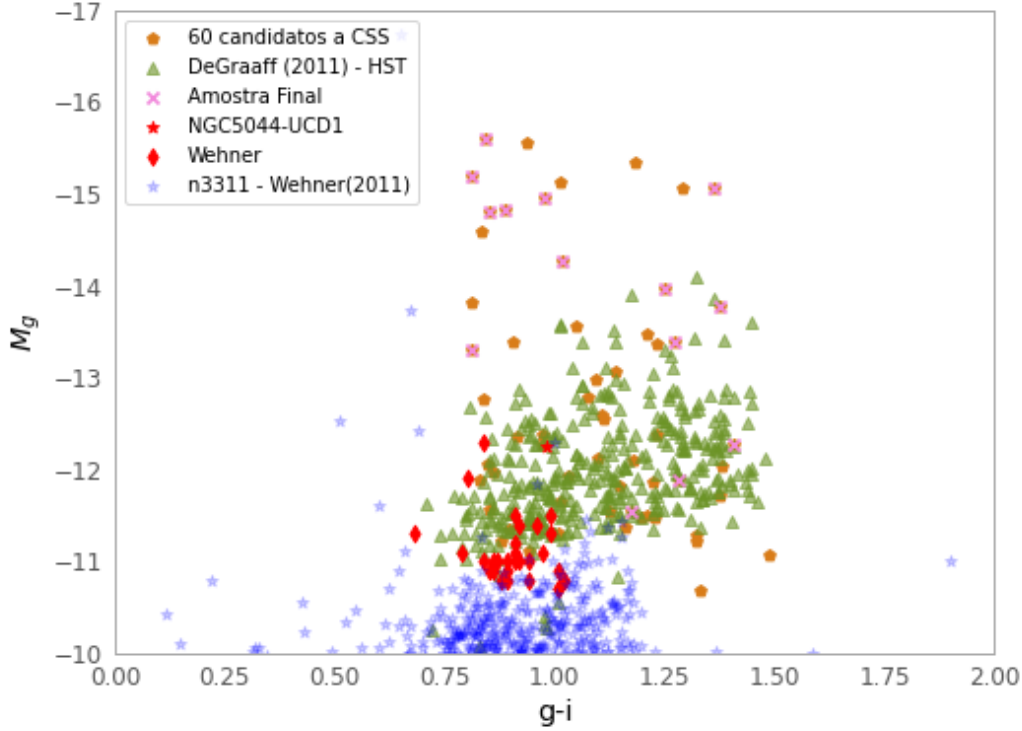


Figura 18 – Diagrama Cor-Magnitude: os círculos laranjas representam os objetos da amostra fotométrica do GMOS, as cruzes em verde representam a amostra de G2011, os triângulos roxos representam os nossos 37 candidatos a CSS, e os hexágonos rosas são os nossos candidatos a CSS que possuem  $S/N \geq 5$ . Os diamantes vermelhos são candidatos a UCD da NGC 3311 (WEHNER et al., 2008a), a estrela amarela representa a NGC 5044-UCD1 (FAIFER et al., 2017). Os pontos azuis são GCs da NGC3111 (WEHNER et al., 2008b).

Na figura 22, no painel à esquerda, podemos ver a distribuição espacial dos nossos objetos e uma barra de cor que representa suas respectivas velocidades radiais  $V_r$ . No painel direito desta figura podemos ver um histograma com a distribuição dos valores de velocidade radial obtidos. O diagrama da figura 23 ilustra a distância dos objetos até o centro da galáxia ESO 325-G004 (em unidades de raio efetivo desta galáxia), juntamente com suas velocidades radiais correspondentes, e uma barra de cor indicando a cor  $g - i$ . Não foi possível identificar na figura algum padrão significativo em relação às velocidades e às distâncias dos objetos.

A tabela 2 apresenta as velocidades radiais dos objetos da amostra medidas pelo PPXF e suas as incertezas (obtidas conforme procedimento descrito na seção 3.2.1), que estão numa faixa entre  $-93.55 \pm 7.06 \text{ km/s} \leq V_r \leq 333.89 \pm 28.75 \text{ km/s}$ . Também é fornecido nesta tabela o valor de  $\chi^2$  obtido para cada ajuste. Também apresentamos os correspondentes *redshifts* medidos para cada objeto, bem como suas incertezas. Com base nas velocidades radiais medidas e suas respectivas incertezas, podemos concluir que todos

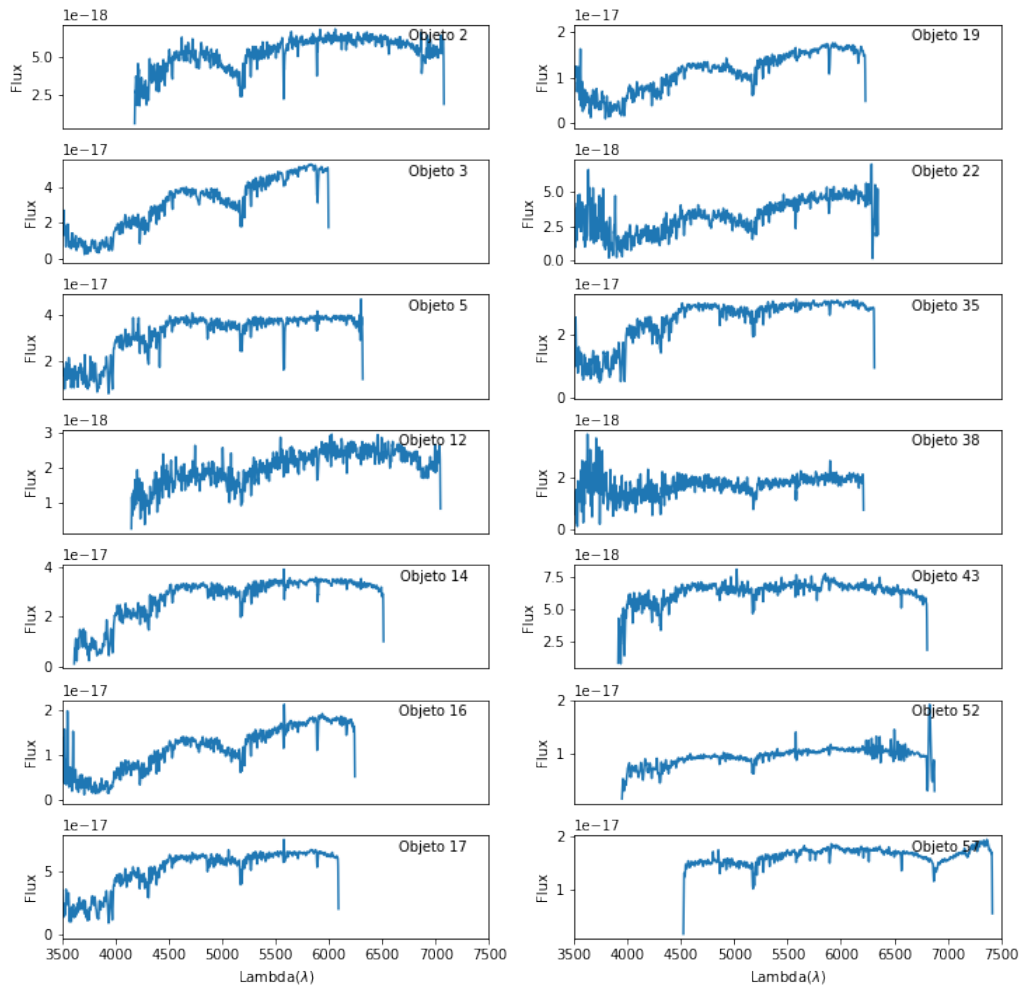


Figura 19 – Espectros dos 14 objetos da nossa amostra final.

os objetos da amostra final fazem parte do sistema da ESO 325-G004.

Para uma análise mais detalhada de cada um dos candidatos a CSS, seriam necessárias novas observações, com dados de maior resolução espectral. Isso possibilitaria obter valores de dispersão de velocidades de cada um dos objetos, que, por sua vez, poderiam ser usados para estimar a massa dinâmica deles. Em princípio, com as velocidades radiais dos objetos que compõem o sistema da galáxia ESO 325-G004 também seria possível estimar a massa dinâmica desta galáxia. Entretanto, o número de CSSs da amostra deste trabalho não permite que tal análise seja feita.



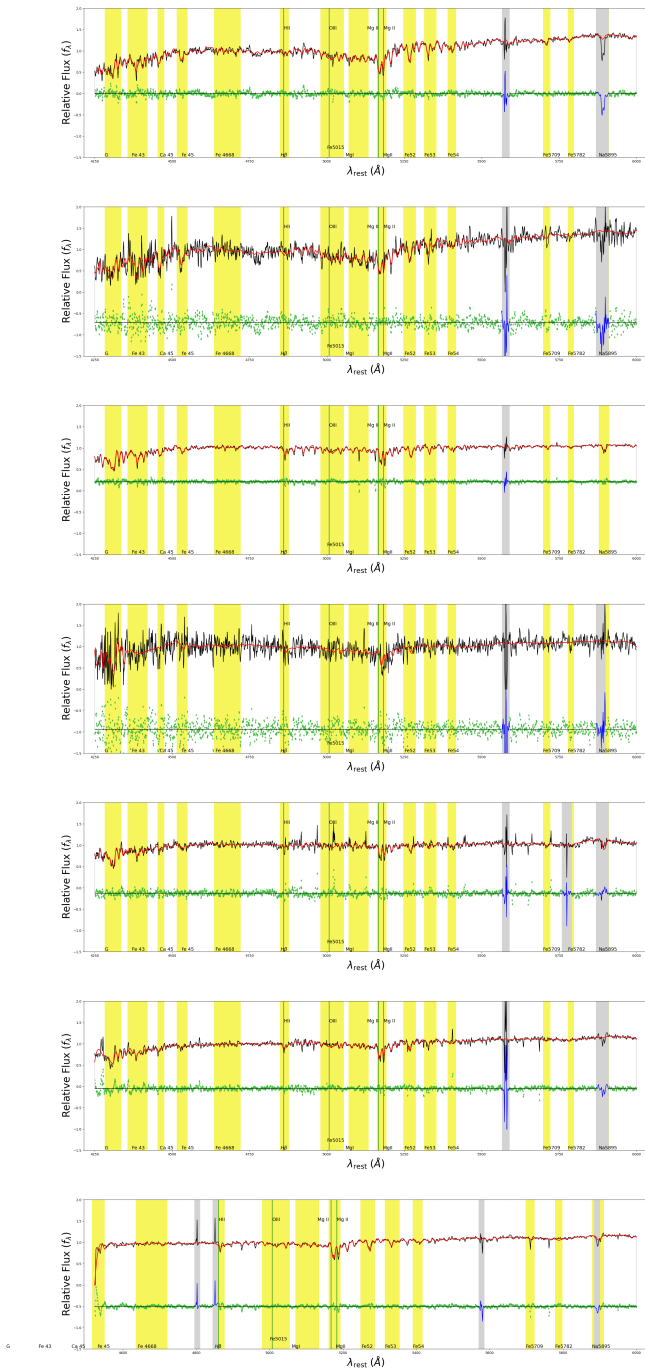


Figura 21 – A linha preta representa o espectro observado, a vermelha o modelo ajustado. O sombreado cinza representa indica região que foi mascarada durante o ajuste, e o sombreado amarelo indica as regiões de linhas espectrais características de CSSs. As linhas verdes verticais são referências das linhas de absorção características. A ordem a partir do painel superior é: objetos 19, 22, 35, 38, 43, 52 e 57.

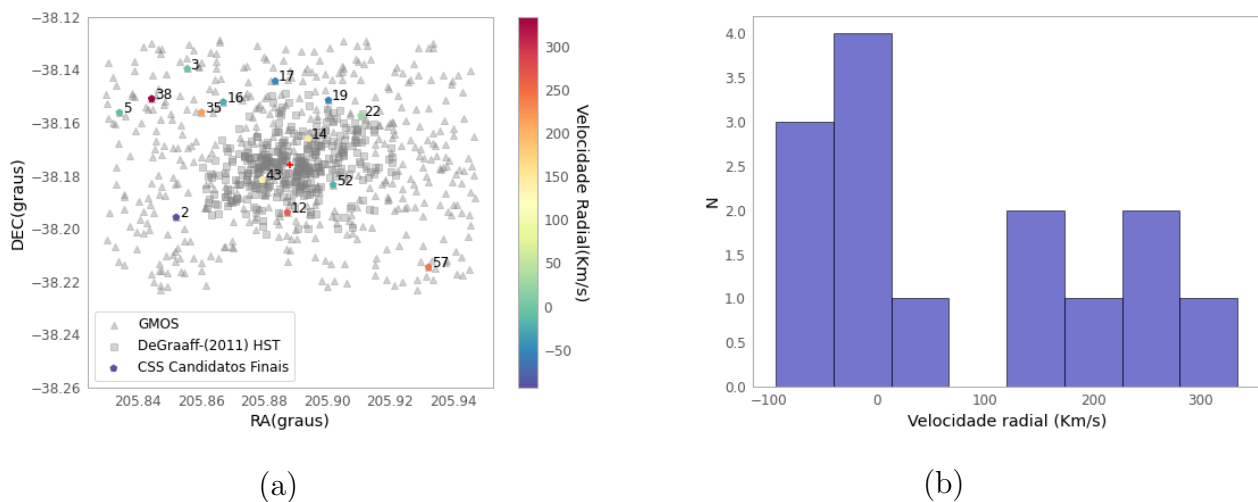


Figura 22 – Distribuição espacial com barra de cor indicando velocidade radial (painel esquerdo), onde os triângulos representam os objetos da amostra final, e os quadrados as observações feitas por G2011. No painel direito vemos um histograma das velocidades radiais dos objetos da amostra final.

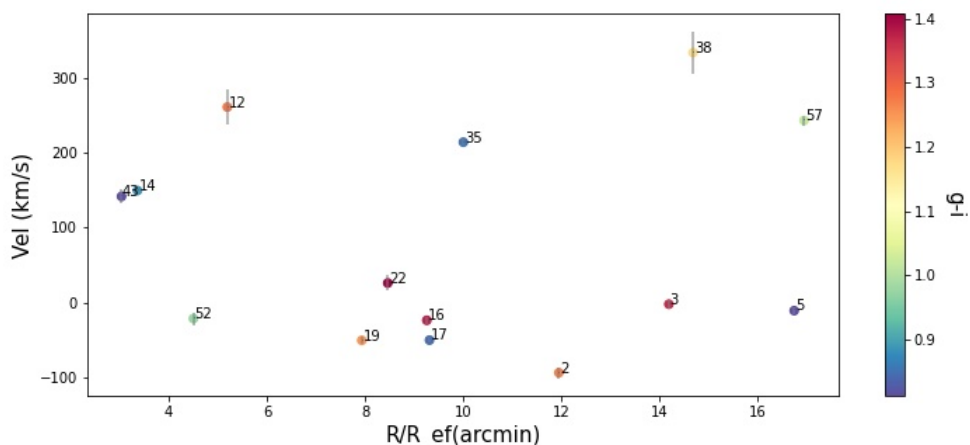


Figura 23 – Diagrama da velocidade radial dos objetos da amostra final em função da distância ao centro da galáxia ESO 325-G004 (em unidades de raio efetivo da galáxia). A barra de cor indica a cor  $g - i$  dos objetos. Os números junto aos pontos indicam o identificador OBJ dos objetos.

### 4.3 Populações Estelares da amostra Final

A tabela 3 resume as informações obtidas sobre as propriedades das populações estelares dos candidatos da amostra final. Ela inclui o identificador de cada candidato, sua metalicidade, razão massa-luminosidade, idade e as respectivas incertezas. Constatamos que a metalicidade dos nossos objetos varia entre  $-0.95 \leq [Fe/H] \leq 0.047$ , representando a fração de Ferro (Fe) por Hidrogênio (H) em cada objeto da amostra final. Valores mais negativos indicam objetos mais pobres em metais. Além disso, as idades que medimos



OBJ	RA	DEC	$V_r$ (km/s)	$\pm$	$z$	$\pm(10^{-5})$	$\chi^2$
2	205.85217	-38.19569	-93.55	7.60	0.03367	2.4	5.74
3	205.85568	-38.13960	-2.05	5.05	0.03399	1.5	27.97
5	205.83417	-38.15611	-10.70	4.22	0.03396	1.0	6.84
12	205.88743	-38.19387	261.16	22.94	0.03490	7.6	5.90
14	205.89405	-38.16593	149.67	3.99	0.03451	1.1	8.04
16	205.86712	-38.15217	-23.58	4.23	0.03391	1.4	7.52
17	205.88361	-38.14426	-50.05	3.82	0.03382	1.0	12.54
19	205.90045	-38.15150	-50.35	5.00	0.03382	1.4	6.01
22	205.91078	-38.15739	26.19	10.06	0.03409	3.2	7.58
35	205.86024	-38.15603	214.26	4.69	0.03473	1.3	7.12
38	205.84439	-38.15091	333.89	28.75	0.03515	8.0	4.69
43	205.87944	-38.18151	141.83	9.81	0.03448	3.1	4.23
52	205.90194	-38.18345	-21.31	8.57	0.03392	2.3	4.85
57	205.93221	-38.21453	243.27	6.79	0.03483	2.1	5.92

Tabela 2 – Identificador e coordenadas dos objetos da amostra final, suas respectivas velocidades radiais, incertezas nas velocidades radiais, os  $\chi^2$  associados a cada ajuste, e os valores de  $z$  e de suas incertezas.

estão entre  $8.92 \leq \log(\text{Idade}) \leq 9.75$ , e a seguir faremos uma comparação com outros objetos compactos da literatura.

OBJ	$\log(\text{Idade})$	$\pm$	$Fe/H$	$\pm$	$(M/L)_\odot$	$\pm$	$R$ (pc)
2	9.41	0.06	-0.12	0.03	5.13	0.24	0.5
3	9.50	0.02	-0.07	0.01	5.53	0.09	5.19
5	9.08	0.14	-0.44	0.10	2.76	0.62	5.39
12	9.54	0.05	-0.06	0.02	5.68	0.22	0.5
14	8.82	0.07	-0.56	0.12	1.03	0.41	4.73
16	9.55	0.02	-0.05	0.01	5.76	0.07	4.83
17	8.99	0.11	-0.66	0.04	1.12	0.31	5.02
19	9.51	0.02	-0.07	0.01	5.57	0.08	0.5
22	9.75	0.05	0.05	0.02	6.61	0.20	0.5
35	9.21	0.12	-0.43	0.20	1.64	0.33	4.84
38	9.59	0.05	-0.03	0.02	5.92	0.22	5.32
43	9.18	0.17	-0.49	0.17	1.91	0.97	0.5
52	8.94	0.15	-0.74	0.39	1.07	0.91	4.68
57	8.92	0.14	-0.95	0.27	0.78	0.57	5.29

Tabela 3 – Tabela com as propriedades das populações estelares dos 14 objetos da amostra final.

Na figura 24 é apresentada uma relação entre a idade e a metalicidade dos nossos objetos, comparados com 4 simulações de GCs do E-MOSAICS <sup>1</sup> (KRUIJSSEN et al., 2019), e com a FCC47-UCD1 (FAHRION et al., 2019). Os painéis superiores da figura

<sup>1</sup> O termo é um acrônimo do termo em inglês *MOdelling Star cluster population Assembly In Cosmological Simulations within EAGLE.*, que pode ser traduzido como *Modelando a Formação da População de Aglomerados Estelares em Simulações Cosmológicas dentro do Projeto EAGLE*

mostram os GCs da simulação MW014 e MW015, que apresentam uma ampla faixa de metalicidades que irão aumentar gradualmente com o tempo. Já os painéis inferiores nos mostram a comparação com os GCs simulados MW009 e MW023, que experimentam uma formação estelar de enriquecimento de metais de forma mais rápida.

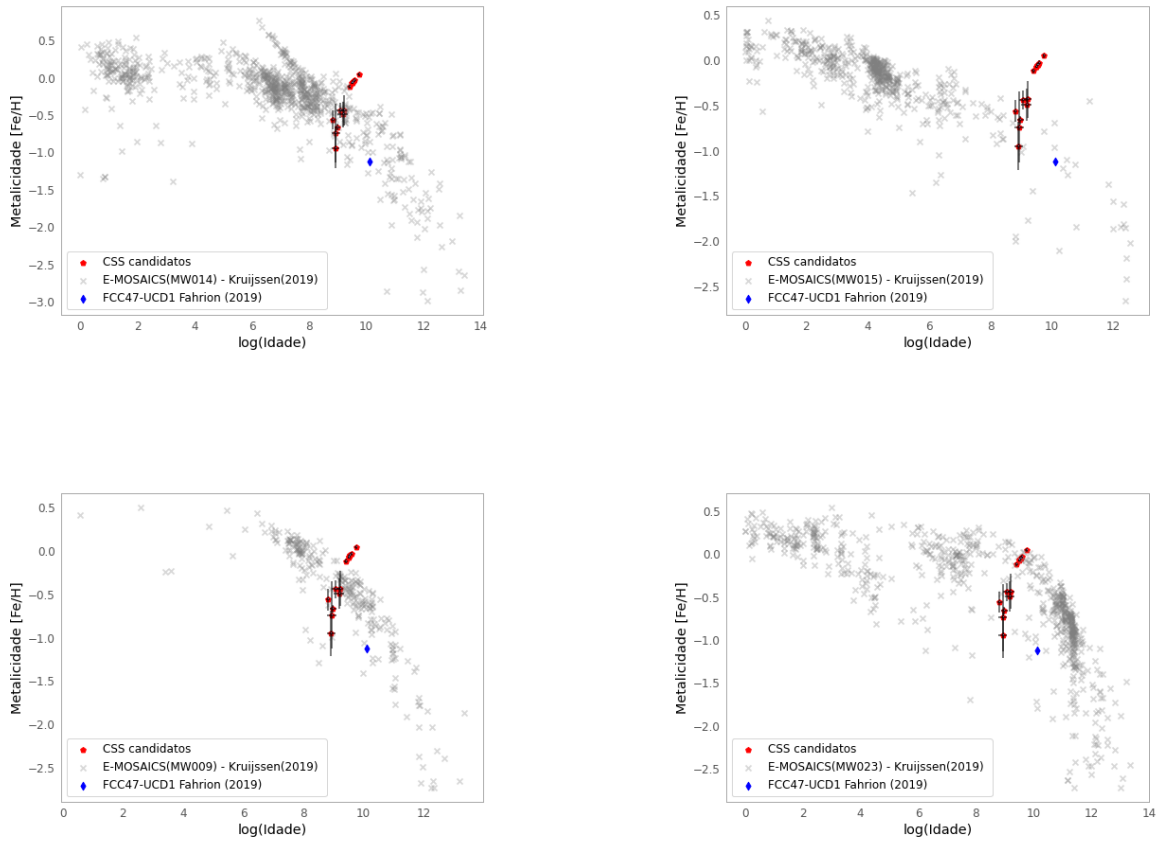


Figura 24 – Nas 4 painéis temos a relação da idade vs metalicidade dos nossos candidatos a CSS comparados com a simulação do E-MOSAICS (KRUIJSSSEN et al., 2019). Na painéis superiores foram utilizados a simulação MW014 e MW015, que possuem uma relação de metalicidade que aumenta gradualmente ao longo do tempo, e nos painéis inferiores vemos as MW009 e MW023, que tiveram um enriquecimento de forma rápida de sua metalicidade.

Ao compararmos nossos CSSs com as simulações MW023 e MW09, observamos que estão próximos do esperado para suas respectivas metalicidades e idade de acordo com a simulação. Contudo, ao analisarmos os painéis das simulações MW014 e MW015, metade dos nossos objetos mais ricos em metais estão em uma faixa acima comparados a suas respectivas idades.

Na figura 25 é apresentada a relação entre metalicidade  $[Fe/H]$  e a razão massa-luminosidade ( $M/L$ ), com a barra de cor representando a cor  $g-i$  dos nossos candidatos. Observa-se que os CSSs mais vermelhos são os mais ricos em metais, além de serem os mais antigos entre os nossos candidatos. Em relação à  $M/L$ , a literatura indica que os

valores típicos para GCs estão na faixa  $1 \leq M/L \leq 3$ , enquanto para UCDs, os valores são aproximadamente  $4 \leq M/L \leq 9$  (HASEGAN, 2005; EVSTIGNEVA et al., 2007).

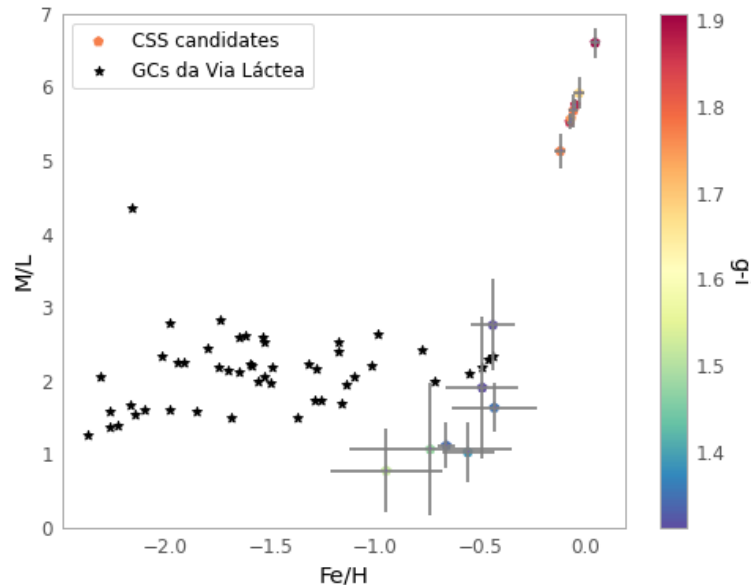


Figura 25 – Relação entre razão massa-luminosidade  $M/L$  e metalicidade  $[Fe/H]$ . Os GCs da Via Láctea foram retirados de Baumgardt (2016), Harris (2010).

Os valores estimados de  $M/L$  para nossos objetos, conforme apresentados na tabela 3, abrangem uma variação de  $0.78 \leq M/L \leq 6.61$ . Há sete objetos que apresentam uma relação  $M/L \geq 5$  e  $[Fe/H] \approx 0$ , os quais podemos considerar como candidatos a UCDs. Esses objetos são os mais velhos e exibem uma cor mais avermelhada. Os outros sete objetos, que apresentam uma cor mais próxima do azul em nosso estudo, exibem características condizentes com GCs.

Assim, em nossa amostra final, sete dos candidatos podem ser categorizados como candidatos a GCs da galáxia ESO 325-G004. Esses objetos são mais pobres em metais, apresentando valores entre  $-0.95 \leq [Fe/H] \leq -0.43$ , e exibem  $M/L \leq 3$ . Para uma melhor classificação, novos estudos, utilizando espectros com uma relação  $S/N$  melhor do que a que obtivemos, sobre os CSSs da galáxia ESO 325-G004 se fazem necessários, para complementar as informações que obtivemos, sejam elas de síntese ou mesmo de cinemática.

#### 4.4 O que são os objetos brilhantes e compactos na direção da ESO 325-G004?

Nossos candidatos, como mostramos ao longo desse trabalho, foram selecionados inicialmente utilizando critérios de cor, como vemos na figura 16 no Capítulo 3. Contudo,

ao analisarmos a figura 18, notamos que alguns dos nossos objetos apresentam brilho superior ao esperado para CSSs, com uma faixa  $-16 < M_g < -14$ . Essa faixa ultrapassa os limites típicos para GCs, que deveriam se estender até  $M_V = -13$  mag, com o pico desse brilho em  $M_V = -7.5$  mag (REJKUBA, 2012).

A tabela 3 apresenta uma coluna com os valores dos raios dos nossos objetos, determinados pelo colaborador Dr. John Blakeslee. Esses raios foram obtidos utilizando o software SExtractor, medindo o  $FWHM$  de cada objeto na banda  $g$  e considerando a escala de 95 pc/pixel, correspondente à distância da galáxia ESO 325-G004. Na figura 26 temos um mosaico com cada um dos objetos da amostra final, retirados das imagens obtidas com o Gemini/GMOS nas banda  $g$ ,  $r$  e  $i$ . Alguns desses objetos claramente apresentam tamanho e brilho aparente maior que os outros e não são objetos alongados o suficiente que pudessem ter sido removidos da amostra. Além disso, esses objetos exibem características de idade, metalicidade e  $M/L$  de CSSs, conforme discutido na seção 4.3.

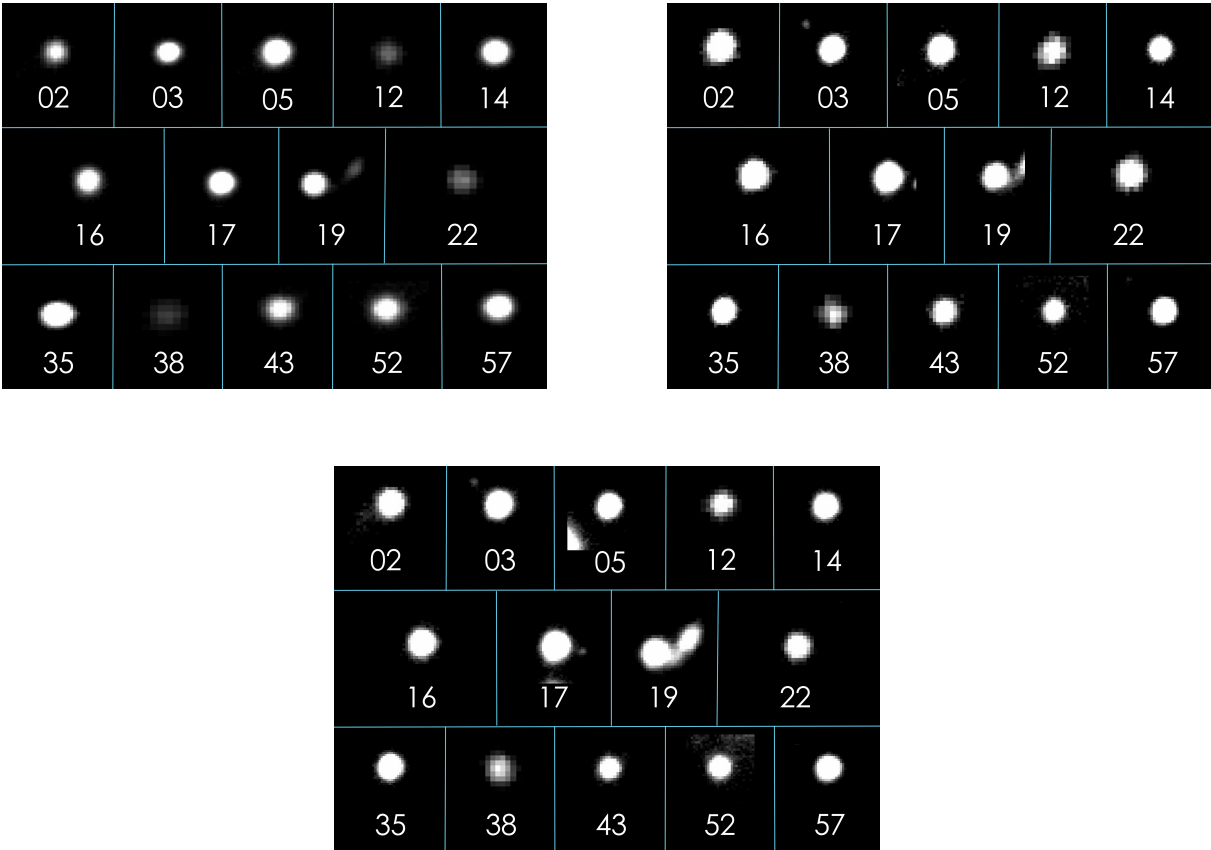


Figura 26 – Mosaico com imagens dos 14 objetos da amostra final na banda  $g$  (painel superior esquerdo),  $r$  (painel superior direito) e  $i$  (painel inferior).

Na figura 27, apresentamos um diagrama cor-magnitude ( $g-i$  vs  $M_g$ ), com uma barra de cor lateral indicando o raio dos objetos em parsec. Observamos que os objetos mais brilhantes correspondem principalmente aos maiores, sendo que 7 deles se encontram na faixa  $-16 \leq M_g \leq -14$ , com raio entre 4 – 5 pc. Convencionalmente, os GCs exibem uma função de luminosidade com um pico em  $M_V \approx -7.5$  mag (BRODIE; STRADER,

2006). Portanto, apesar de apresentarem raios compatíveis com GCs, os objetos com  $-16 \leq M_g \leq -14$ , não parecem integrar uma distribuição típica de GCs, devido à sua magnitude excepcionalmente brilhante.

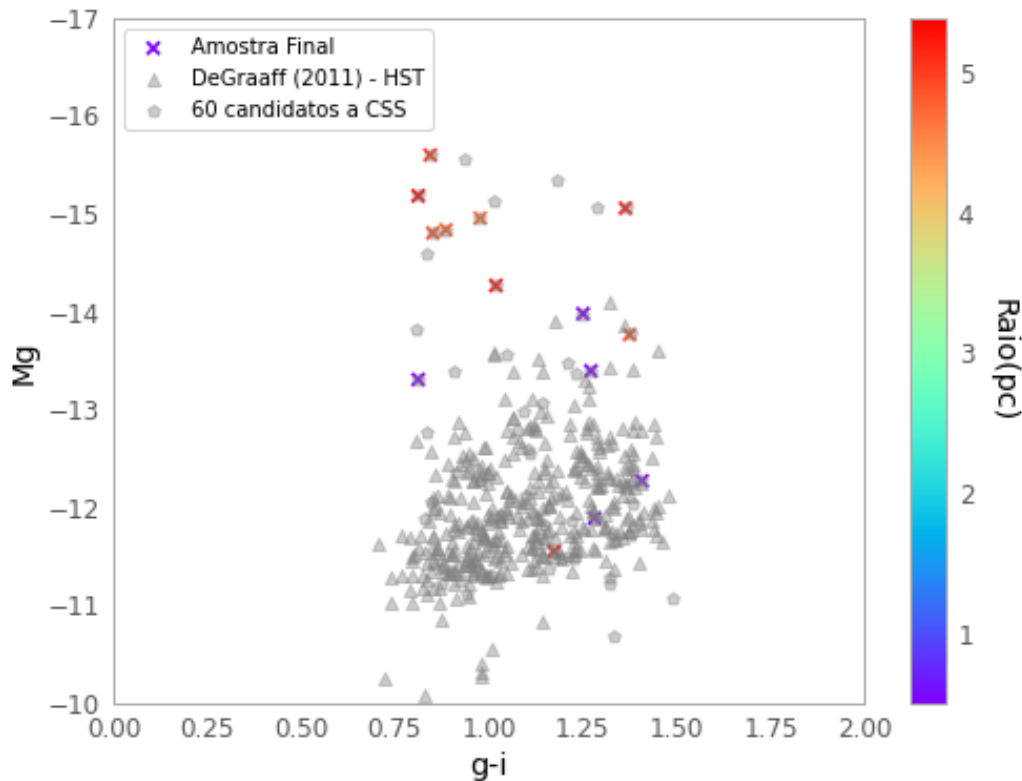


Figura 27 – Diagrama de cor-magnitude, com barra de cores representando os raios em parsec dos 14 objetos da amostra final. Vemos que os objetos mais brilhantes, numa faixa de  $M_g$  entre  $-14$  e  $-16$  mag, também são os que possuem maiores raios, estando por volta de 5 pc. Apenas um dos objetos com maior raio se encontra na faixa abaixo de  $M_g = -14$  mag. Os triângulos cinzas representam a amostra de G2011 e os hexágonos representam os 60 objetos da nossa amostra inicial de candidatos a CSS.

Na figura 28, exploramos o diagrama cor-magnitude ( $g-i$  vs  $M_g$ ), utilizando a barra de cores para representar a  $M/L$ , onde observamos que apenas um dos objetos da faixa mais brilhante  $-14 \leq M_g \leq -16$  possui uma razão  $M/L \geq 5$ . Logicamente, poderíamos inferir que objetos nessa faixa de magnitude seriam UCDs. Contudo, embora sejam os maiores objetos da amostra espectroscópica, com tamanhos entre 4 – 5 pc, é importante notar que UCDs, conforme a figura 7 da introdução, costumam ter dimensões um pouco maiores, situando entre 10 – 100 pc. Além disso, para UCDs é comum encontrar  $M/L$  no intervalo entre 4 a 9.

Esses objetos possuem cores condizentes com CSSs, faixa de idades e razão  $M/L$  dentro da faixa esperada para GCs/UCDs, o que não explica o brilho que averiguamos. Por

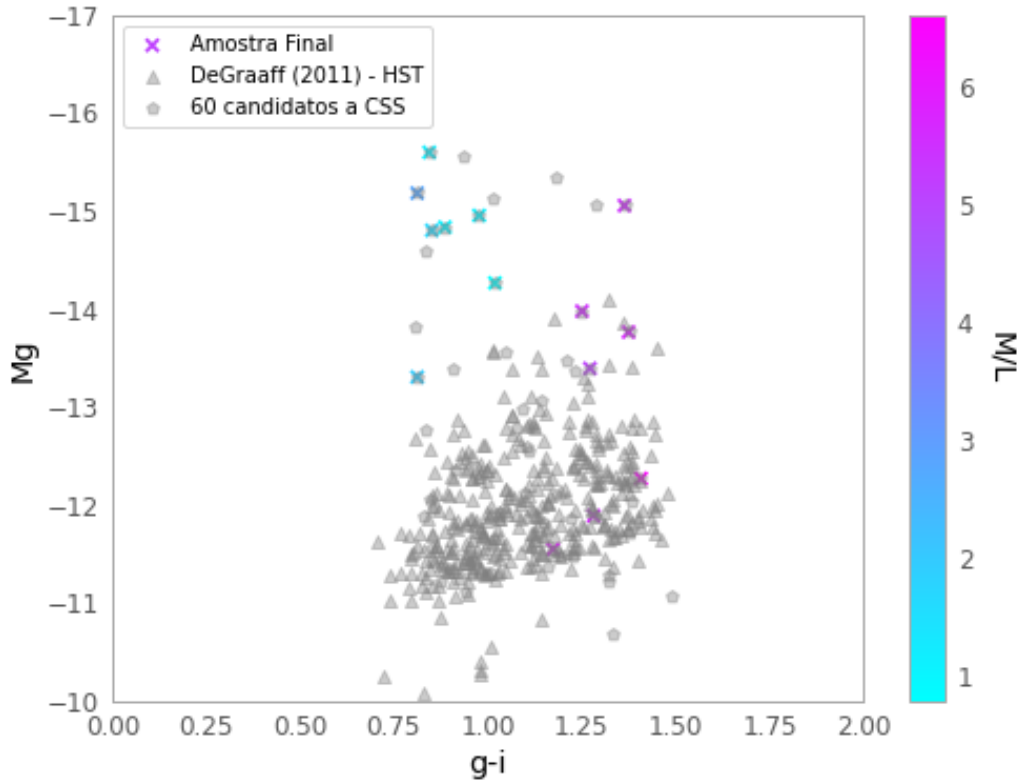


Figura 28 – Diagrama cor x magnitude, com barra de cor mostrando a razão massa-luminosidade dos objetos da amostra final. Os objetos que apresentam maior razão  $M/L$  não são em suma os mais brilhantes, ou seja, aqueles que possuem magnitude absoluta na banda  $g$ ,  $M_g$  entre  $-14$  a  $-16$ . Os hexágonos cinzas representam os 60 objetos iniciais da amostra e os triângulos são os objetos da amostra de G2011.

exemplo, galáxias compactas, como a M32, possuem brilho na faixa de  $-16 \leq Mg \leq -14$ . Entretanto, como mostra a figura 7, elas possuem raio da ordem de 100 pc ou mais.

Para uma análise mais precisa desses objetos, são necessárias novas medidas de raios para confirmar seus respectivos tamanhos. Tais medidas podem ser obtidas através de ferramentas como o GALFIT<sup>2</sup> ou IMFIT<sup>3</sup>, e os resultados poderiam ser comparados com os resultados aqui encontrados. Isso possibilitaria determinar a categoria específica de CSS à qual esses objetos pertencem.

## 4.5 Comparação com objetos catalogados por G2011

No terceiro capítulo de BG2008, há um catálogo de candidatos a UCDs para o sistema da galáxia ESO 325-G004. Ao comparar as coordenadas dos nossos CSSs com as

<sup>2</sup> <https://users.obs.carnegiescience.edu/peng/work/galfit/galfit.html>

<sup>3</sup> <https://www.mpe.mpg.de/~erwin/code/imfit/>

dos objetos catalogados por BG2008 dentro de uma incerteza de  $1''$ , identificamos duas correspondências no catálogo de BG2008: os objetos 1 e 9 da nossa amostra.

O objeto 9 (ver tabela 1), possui uma relação  $S/N < 5$ , e para determinar alguma informação de cinemática, ou mesmo de síntese de população estelar, o espectro se apresenta muito ruidoso. Conseqüentemente, as informações cinemáticas ou de síntese de populações estelares deste objeto, da nossa amostra, não poderão ser aprofundadas neste momento. Contudo, é um objeto para estudo futuro, particularmente se houver novas observações com equipamentos que ofereçam melhor resolução espectral

Por outro lado, o objeto 1 possui  $S/N = 12$ , o que é suficiente para determinar  $z$  e confirmar se faz parte do sistema da nossa galáxia central. Após uma análise detalhada do espectro deste objeto, notamos que ele pode estar a uma distância significativamente maior do que a da galáxia ESO 325-G004.

Para determinar então em qual  $z$  se encontra esse objeto, utilizamos o pacote Radial Velocity SAO Package RVSAO do IRAF<sup>4</sup>. Mais especificamente, utilizamos a tarefa XC-SAO, que aplica um método de correlação cruzada entre o nosso espectro e um conjunto de espectros de velocidades conhecidas. Como resultado, o valor encontrado foi de  $z = 0.36$ . Após esse passo, foi então colocado o espectro no referencial correto, como podemos ver na figura 29.

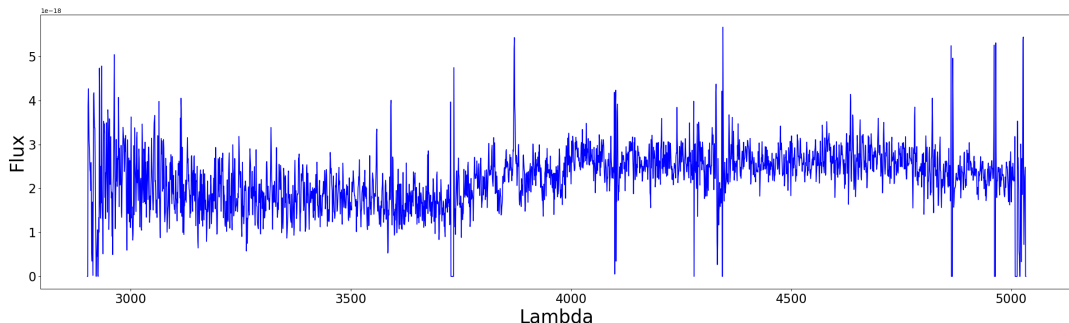


Figura 29 – A figura mostra o espectro do objeto 01 ajustado o comprimento de onda para o referencial do universo local.

Dessa forma, o objeto 1 não pertence ao sistema da ESO 325-G004, embora suas cores sejam compatíveis com GCs/UCDs, levando à sua catalogação por BG2008. O valor do raio (81.3 pc), obtido em G2011, está dentro dos limites que esperamos para UCDs (10–100 pc). No entanto, uma nova medida deve ser realizada, considerando a informação de *redshift* atualizada.

<sup>4</sup> <https://iraf.net/>





## 5 Conclusões e Perspectivas

A compreensão sobre a evolução de galáxias passa também por compreender e estudar Sistemas Estelares Compactos, como os GCs e UCDs, que geralmente orbitam galáxias. A cinemática e o histórico de formação estelar destes objetos podem ser a chave para entender esses sistemas complexos que são as galáxias.

Estudos foram conduzidos por BG2008 e G2011 sobre CSS ao redor da galáxia ESO 325-G004, uma gigante elíptica que se encontra no centro do Aglomerado Pobre Abell S0740, com um *redshift*  $z = 0.035$  e  $m - M = 35.5$  e uma distância de aproximadamente 160 Mpc. Neste trabalho, buscamos complementar as pesquisas conduzidas por BG2008 e G2011, cuja observações do HST foram utilizadas para identificar e catalogar possíveis candidatos a UCDs dentro do sistema.

Utilizamos dados fotométricos e espectroscópicos obtidos com o Gemini/GMOS para investigar a cinemática e as propriedades dos CSSs em torno da ESO 325-G004. Obtivemos os espectros de 60 candidatos a CSS selecionados a partir dos trabalhos de BG2008 e G2011. Através de análises visuais e busca em outros catálogos, foram retirados os que são classificados como galáxias ou estrelas, resultando em uma amostra de 37 objetos para estudo.

Neste trabalho também foi utilizado o modelo de populações estelares simples MILES (VAZDEKIS et al., 2010) e o código PPXF para determinar as informações de cinemática e as propriedades das populações estelares dos nossos candidatos.

Dentre os nossos candidatos a CSS, dois objetos catalogados como candidatos a UCDs por BG2008 e G2011 foram confirmados como parte da nossa amostra, denominados como objetos 1 e 9. Antes de obter outras informações, foi preciso determinar o *redshift*, a fim de confirmar se pertencem ao sistema da nossa galáxia central. Para o objeto 1, obtivemos o valor de  $z = 0.36$ , mostrando que o mesmo se encontra a uma maior distância do que a ESO 325-G004. Novas medidas de raio, massa e outras informações deverão ser realizadas em outro momento para uma nova classificação deste objeto, uma vez que possivelmente seu raio, cujo valor atual é de 81.3 pc, seja na realidade maior que o intervalo 10 – 100 pc, onde se encontra a maior parte dos UCDs, podendo ser descartado como pertencente a esta categoria de objetos no momento.

Para o restante da nossa amostra, selecionamos aqueles cujos espectros possuísem  $S/N \geq 5$  e características comuns de GCs/UCDs, como por exemplo linha de absorção do Mg b (5175 Å à 5195Å). No final, apenas 14 objetos atenderam esses critérios para análises.

Na seção 4.2 apresentamos os resultados obtidos com os ajustes do PPXF para cinemática. Todos os 14 candidatos possuem *redshift* muito próximo daquele da nossa

galáxia hospedeira e suas velocidades radiais variam entre  $-93$  a  $300$  km/s, indicando que pertencem ao sistema da galáxia hospedeira.

Na seção 4.3, através de síntese de populações estelares, foi possível determinar metalicidade, idade e razão massa-luminosidade de cada um dos nossos candidatos a CSS. Para a metalicidade temos valores entre  $-0.95 \leq [Fe/H] \leq 0.047$ , que são valores esperados para GCs na faixa de idade estimada entre  $8.92 \leq \log(Idade) \leq 9.75$ , e valores de  $0.78 \leq M/L \leq 6.61$ .

Embora alguns dos nossos objetos tenham uma relação  $M/L \geq 5$ , isso não constitui uma evidência forte o suficiente para que possamos afirmar que sejam UCDs, porém são candidatos a tal. Uma particularidade, mostrada na figura 25, é que apenas os objetos mais vermelhos do nosso sistema possuem essa característica, enquanto nossos objetos mais azuis possuem características típicas de GCs.

Alguns objetos apresentaram magnitude absoluta  $-16 \leq Mg \leq -14$ , sendo mais brilhantes do que costumam ser objetos compactos como GCs e UCDs. Esses objetos apresentam característica de cor, idade, metalicidade e  $M/L$  condizente com CSSs, porém, com brilho bastante elevado. Uma abordagem plausível seria considerar esses objetos como galáxias compactas, como a M32, por exemplo, ou UCDs mais brilhantes que o comum, mas a figura 7 na nossa introdução mostra que os raios destes objetos deveriam ser maiores do que  $100$  pc, e nossas medidas mostraram que eles estão em uma faixa entre  $4 - 5$  pc.

Assim, esse trabalho apresentou 14 CSS no entorno da galáxia ESO 325-G004, através de um análise da cinemática e síntese de populações estelares, confirmando que os mesmos fazem parte do sistema, possuindo velocidade radial coerentes com o sistema, e com metalicidade, idade e  $M/L$  compatíveis com sistemas como GCs. São necessárias medidas mais precisas de seus respectivos raios para poder confirmar sua possível natureza de UCDs.

Os próximos passos deste estudo incluem a utilização das velocidades radiais  $V_r$  dos nossos GCs para uma possível estimativa da massa da galáxia hospedeira. Também é possível utilizar a equação (1) encontrada em Fahrion et al. (2019), da relação massa-metalicidade e estimar a massa dos nossos objetos. Além disso, novas medidas dos raios dos nossos objetos deverão ser realizadas utilizando outros softwares.

# Referências

ABELL, G. O. The Distribution of Rich Clusters of Galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement**, v. 3, p. 211, maio 1958. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1958ApJS....3..211A>.

ABELL, G. O. **Realm of the Universe**. [S.l.]: Holt, Rinehart and Winston, 1976.

ABELL, G. O. et al. A Catalog of Rich Clusters of Galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series (ISSN 0067-0049)**, v. 70, p. 1, maio 1989. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1989ApJS...70....1A>.

ABRAHAM, R. G. et al. The Morphological Evolution of Galaxies. **Science**, v. 293, n. 5533, p. 1273–1278, ago. 2001. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001Sci...293.1273A>.

AHN, C. P. et al. The Black Hole in the Most Massive Ultracompact Dwarf Galaxy M59-UCD3. **The Astrophysical Journal**, v. 858, n. 2, p. 102, maio 2018. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...858..102A>.

ASHMAN, K. M. et al. Some Constraints on the Formation of Globular Clusters. **The Astronomical Journal**, v. 122, n. 4, p. 1888–1895, out. 2001. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001AJ....122.1888A>.

BAHCALL, N. A. Clusters of galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 15, p. 505–540, jan. 1977. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1977ARA&A..15..505B>.

BAUMGARDT, H. N-body modelling of globular clusters: masses, mass-to-light ratios and intermediate-mass black holes. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 464, n. 2, p. 2174–2202, out. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stw2488>.

BAUTZ, L. P. et al. On the Classification of the Forms of Clusters of Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 162, p. L149, dez. 1970. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1970ApJ...162L.149B>.

BEASLEY, M. A. Globular Cluster Systems and Galaxy Formation. **Reviews in Frontiers of Modern Astrophysics; From Space Debris to Cosmology**, p. 245–277, 2020. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020rfma.book..245B>.

BECKMAN, J. et al. The role of mergers in galaxy evolution. **Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 8, p. 77–83, out. 2008. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008ChJAS...8...77B>.

BEKKI, K. et al. Galaxy threshing and the origin of ultra-compact dwarf galaxies in the fornax cluster. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 344, n. 2, p. 399–411, sep 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1046%2Fj.1365-8711.2003.06916.x>.

- BLAKESLEE, J. P. ACS Studies of Clusters and Superclusters of Galaxies. In: Metcalfe, N. et al. (Ed.). **Cosmic Frontiers**. [s.n.], 2007. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 379), p. 99. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007ASPC..379...99B>).
- BLAKESLEE, J. P. et al. Ultra-compact dwarf candidates near the lensing galaxy in abell s0740. **The Astronomical Journal**, The American Astronomical Society, v. 136, n. 6, p. 2295, nov 2008. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/136/6/2295>).
- BORLAFF, A. et al. Formation of s0 galaxies through mergers. antitruncated stellar discs resulting from major mergers. **Astronomy and Astrophysics**, v. 570, p. A103, 2014. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014A%26A...570A.103B>).
- BOSELLI, A. et al. Environmental effects on late-type galaxies in nearby clusters. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, The University of Chicago Press, v. 118, n. 842, p. 517, may 2006. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/500691>).
- BRODIE, J. P. et al. The SAGES Legacy Unifying Globulars and GalaxieS Survey (SLUGGS): Sample Definition, Methods, and Initial Results. **The Astrophysical Journal**, v. 796, n. 1, p. 52, nov. 2014. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJ...796...52B>).
- BRODIE, J. P. et al. Extragalactic globular clusters and galaxy formation. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, Annual Reviews, v. 44, n. 1, p. 193–267, set. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.44.051905.092441>).
- BUTA, R. **Galaxy Morphology**. [s.l.]: Cambridge University Press, 2013. 155 p.
- CANTIELLO, M. et al. On the metallicity-color relations and bimodal color distributions in extragalactic globular cluster systems. **The Astrophysical Journal**, v. 669, n. 2, p. 982, nov 2007. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/522110>).
- CAPPELLARI, M. Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with gauss–hermite functions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 466, n. 1, p. 798–811, nov. 2016. ISSN 1365-2966. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stw3020>).
- CAPPELLARI, M. et al. Parametric recovery of line-of-sight velocity distributions from absorption-line spectra of galaxies via penalized likelihood. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, IOP Publishing, v. 116, n. 816, p. 138–147, feb 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1086%2F381875>).
- CHIES-SANTOS, A. L. et al. The old globular cluster system of NGC 4365: new VLT/FORS2 spectra. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 427, n. 3, p. 2349–2358, 12 2012. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.22135.x>).
- CHIES-SANTOS, A. L. et al. An optical/nir survey of globular clusters in early-type galaxies. i. introduction and data reduction procedures. **Astronomy & Astrophysics**, v. 525, n. 1, p. A19, 2011. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011A%26A...525A..19C>).

CORTESI, A. et al. Planetary nebula spectrograph survey of s0 galaxy kinematics – ii. clues to the origins of s0 galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 432, n. 2, p. 1010–1020, maio 2013. ISSN 1365-2966. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt529>.

DEGRAAFF, R. G. B. **A Study of Globular Cluster Systems in the Shapley Supercluster Region with the Hubble Space Telescope**. Washington State University, 2011. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011PhDT.....206B>.

DEKEL, A. et al. Lost and found dark matter in elliptical galaxies. **Nature**, Springer Science and Business Media LLC, v. 437, n. 7059, p. 707–710, set. 2005. ISSN 1476-4687. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nature03970>.

DRESSLER, A. Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 236, p. 351–365, mar. 1980. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980ApJ...236..351D>.

DRINKWATER, M. J. et al. Compact stellar systems in the fornax cluster: Super-massive star clusters or extremely compact dwarf galaxies? **Publications of the Astronomical Society of Australia**, Cambridge University Press (CUP), v. 17, n. 3, p. 227–233, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1071%2Fas00034>.

EBELING, H. et al. Jellyfish: Ram pressure stripping as a diagnostic tool in studies of cluster collisions. **The Astrophysical Journal**, American Astronomical Society, v. 882, n. 2, p. 127, set. 2019. ISSN 1538-4357. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab35d6>.

EBELING, H. et al. Jellyfish: Evidence of Extreme Ram-pressure Stripping in Massive Galaxy Clusters. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 781, n. 2, p. L40, fev. 2014. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJ...781L..40E>.

ELMEGREEN, B. G. et al. A universal formation mechanism for open and globular clusters in turbulent gas. **The Astrophysical Journal**, v. 480, n. 1, p. 235–245, 1997. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997ApJ...480..235E>.

EVSTIGNEEVA, E. A. et al. Searches for ultracompact dwarf galaxies in galaxy groups. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 378, n. 3, p. 1036–1042, jun 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111%2Fj.1365-2966.2007.11856.x>.

FABIAN, A. C. Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 50, p. 455–489, set. 2012. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012ARA&A..50..455F>.

FAHRION, K. et al. Single metal-poor ultra compact dwarf galaxy at one kiloparsec distance from the low-mass elliptical galaxy fcc 47. **Astronomy & Astrophysics**, v. 625, p. A50, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834941>.

FAIFER, F. R. et al. First confirmed ultra-compact dwarf galaxy in the ngc4 group. **Astronomy & Astrophysics**, v. 599, p. L8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730493>.

FITZPATRICK, P. J. et al. Early-type galaxy star formation histories in different environments. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 447, n. 2, p. 1383–1397, dez. 2014. ISSN 0035-8711. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stu2509>.

FORBES, D. A. et al. Bulge globular clusters in spiral galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 556, n. 2, p. L83–L86, 2001. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...556L..83F>.

GARLAND, C. A. et al. Nearby clumpy, gas rich, star-forming galaxies: Local analogs of high-redshift clumpy galaxies. **The Astrophysical Journal**, American Astronomical Society, v. 807, n. 2, p. 134, jul. 2015. ISSN 1538-4357. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/807/2/134>.

GERHARD, O. E. Line-of-sight velocity profiles in spherical galaxies: breaking the degeneracy between anisotropy and mass. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 265, p. 213, nov. 1993. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993MNRAS.265..213G>.

GÖLLER, J. et al. Jellyfish galaxies with the IllustrisTNG simulations - No enhanced population-wide star formation according to TNG50. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 525, n. 3, p. 3551–3570, nov. 2023. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023MNRAS.525.3551G>.

GUNN, J. E. et al. On the infall of matter into clusters of galaxies and some effects on their evolution. **The Astrophysical Journal**, v. 176, p. 1, 1972. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1972ApJ...176....1G>.

HARRIS, W. E. A new catalog of globular clusters in the milky way. **arXiv preprint arXiv:1012.3224**, 2010.

HARRIS, W. E. et al. Globular cluster systems in brightest cluster galaxies. ii. ngc 6166. **The Astrophysical Journal**, v. 817, n. 1, p. 58, jan. 2016. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016ApJ...817...58H>.

HASEGAN, M. Faint Stellar Systems: Ultra-Luminous Globular Clusters and Ultra-Compact Dwarf Galaxies. In: **American Astronomical Society Meeting Abstracts**. [s.n.], 2005. (American Astronomical Society Meeting Abstracts, v. 207), p. 89.03. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005AAS...207.8903H>.

HILKER, M. UCDs - A Mixed Bag of Objects. In: Richtler, T. et al. (Ed.). **Globular Clusters - Guides to Galaxies**. [s.n.], 2009. p. 51. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009gcgg.book...51H>.

HILKER, M. et al. Weighing Ultracompact Dwarf Galaxies in the Fornax Cluster. **The Messenger**, v. 129, p. 49–52, set. 2007. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007Msngr.129...49H>.

HILKER, M. et al. The central region of the fornax cluster - iii. dwarf galaxies, globular clusters, and cd halo - are there interrelations? **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 138, n. 1, p. 55–70, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/aas:1999495>.

HILKER, M. et al. The Hydra I cluster core. II. Kinematic complexity in a rising velocity dispersion profile around the cD galaxy NGC 3311. **Astronomy & Astrophysics**, v. 619, p. A70, nov. 2018. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A&A...619A..70H>.

HUANG, S. et al. The carnegie-irvine galaxy survey. iv. a method to determine the average mass ratio of mergers that built massive elliptical galaxies. **The Astrophysical Journal**, The American Astronomical Society, v. 821, n. 2, p. 114, apr 2016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/821/2/114>.

INAGAKI, T. et al. Stellar mass assembly of brightest cluster galaxies at late times. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 446, n. 1, p. 1107–1114, 11 2014. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2126>.

IODICE, E. et al. The fornax3d project: Tracing the assembly history of the cluster from the kinematic and line-strength maps. **Astronomy & Astrophysics**, v. 627, p. A136, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935721>.

JANZ, J. et al. The AIMSS Project – III. The stellar populations of compact stellar systems. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 456, n. 1, p. 617–632, 12 2015. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2636>.

JENNINGS, Z. G. et al. The SLUGGS Survey: HST/ACS Mosaic Imaging of the NGC 3115 Globular Cluster System. **The Astronomical Journal**, v. 148, n. 2, p. 32, ago. 2014. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014AJ....148...32J>.

KRAVTSOV, A. V. et al. Formation of galaxy clusters. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, Annual Reviews, v. 50, n. 1, p. 353–409, sep 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1146%2Fannurev-astro-081811-125502>.

KRUIJSSEN, J. M. D. et al. The E-MOSAICS project: tracing galaxy formation and assembly with the age–metallicity distribution of globular clusters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 486, n. 3, p. 3134–3179, 04 2019. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/stz968>.

LA BARBERA, F. et al. SPIDER - X. Environmental effects in central and satellite early-type galaxies through the stellar fossil record. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 445, n. 2, p. 1977–1996, dez. 2014. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014MNRAS.445.1977L>.

LACERNA, I. et al. SDSS-IV MaNGA: Global and local stellar population properties of elliptical galaxies. **Astronomy & Astrophysics**, v. 644, p. A117, dez. 2020. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020A&A...644A.117L>.

LEE, S.-Y. et al. Nonlinear Color-Metallicity Relations of Globular Clusters. VIII. Reproducing Color Distributions of Individual Globular Cluster Systems in the Virgo and Fornax Galaxy Clusters. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 240, n. 1, p. 2, jan. 2019. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJS..240....2L>.

LIMA NETO, G. B. **Astronomia Extragaláctica e Cosmologia**. [S.l.]: [s.n.], 2020.

LOURENÇO, A. C. C. et al. The effect of cluster dynamical state on ram-pressure stripping. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 526, n. 4, p. 4831–4847, dez. 2023. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023MNRAS.526.4831L>.

MAREL, R. P. van der et al. A New Method for the Identification of Non-Gaussian Line Profiles in Elliptical Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 407, p. 525, abr. 1993. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993ApJ...407..525V>.

MASSARI, D. et al. Origin of the system of globular clusters in the Milky Way. **Astronomy & Astrophysics**, v. 630, p. L4, out. 2019. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019A&A...630L...4M>.

MAYES, R. et al. Supermassive black holes in ucds formed from the nuclei of disrupted galaxies. **arXiv preprint arXiv:2302.08082**, 2023.

MIESKE, S. et al. On central black holes in ultra-compact dwarf galaxies. **Astronomy & Astrophysics**. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322167>.

MIESKE, S. et al. The nature of ucds: Internal dynamics from an expanded sample and homogeneous database. **Astronomy & Astrophysics**, v. 487, n. 3, p. 921–935, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810077>.

MILLER, B. W. et al. The specific globular cluster frequencies of dwarf elliptical galaxies from the hubble space telescope. **The Astrophysical Journal**, v. 508, n. 2, p. L133–L137, 1998. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998ApJ...508L.133M>.

MISGELD, I. et al. Families of dynamically hot stellar systems over 10 orders of magnitude in mass. , v. 414, n. 4, p. 3699–3710, jul. 2011. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011MNRAS.414.3699M>.

NORRIS, M. A. et al. The AIMSS Project – I. Bridging the star cluster–galaxy divide. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 443, n. 2, p. 1151–1172, 07 2014. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1186>.

OLDHAM, L. J. et al. Galaxy structure from multiple tracers - i. a census of m87's globular cluster populations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 455, n. 1, p. 820–830, 2016. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.455..820O>.

OSER, L. et al. The two phases of galaxy formation. **The Astrophysical Journal**, v. 725, n. 2, p. 2312–2323, 2010. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010ApJ...725.2312O>.

ÖSTLIN, G. et al. Stellar dynamics of blue compact galaxies. I. Decoupled star-gas kinematics in ESO 400-G43. **Astronomy & Astrophysics**, v. 419, p. L43–L47, maio 2004. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004A&A...419L..43O>.

PASTORELLO, N. et al. The slugs survey: combining stellar and globular cluster metallicities in the outer regions of early-type galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 451, n. 3, p. 2625–2639, ago. 2015. ISSN 0035-8711. Disponível em: <http://doi.org/10.1093/mnras/stv1131>.



PENG, E. W. et al. The ACS Virgo Cluster Survey. IX. The Color Distributions of Globular Cluster Systems in Early-Type Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 639, n. 1, p. 95–119, mar. 2006. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006ApJ..639...95P>.

PFEFFER, J. et al. Ultra-compact dwarf galaxy formation by tidal stripping of nucleated dwarf galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 433, n. 3, p. 1997–2005, 06 2013. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/stt867>.

PRESS, W. H. et al. Formation of galaxies and clusters of galaxies by self-similar gravitational condensation. **The Astrophysical Journal**, v. 187, p. 425–438, 1974. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1974ApJ...187..425P>.

PUZIA, T. H. et al. Vlt spectroscopy of globular cluster systems - i. the photometric and spectroscopic data set. **Astronomy & Astrophysics**, v. 415, n. 1, p. 123–143, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031448>.

REJKUBA, M. Globular cluster luminosity function as distance indicator. **Astrophysics and Space Science**, Springer Science and Business Media LLC, v. 341, n. 1, p. 195–206, jan 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007%2Fs10509-012-0986-9>.

RIX, H.-W. et al. Optimal estimates of line-of-sight velocity distributions from absorptionline spectra of galaxies : nuclear discs in elliptical galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 254, p. 389–403, fev. 1992. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992MNRAS.254..389R>.

ROOD, H. J. et al. "tuning fork" classification of rich clusters of galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, The Astronomical Society of the Pacific, v. 83, n. 493, p. 313, jun 1971. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/129128>.

SANDAGE, A. et al. **Galaxies and the Universe**. University of Chicago Press, 1975. (New Lines in Criminology). ISBN 9780226459615. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=PkhCrgEACAAJ>.

SARTORIS, B. et al. Clash-vlt: a full dynamical reconstruction of the mass profile of abell s1063 from 1 kpc out to the virial radius. **Astronomy & Astrophysics**, v. 637, p. A34, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037521>.

SHAPIRO, K. L. et al. Star-forming galaxies at  $z \sim 2$  and the formation of the metal-rich globular cluster population. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 403, n. 1, p. L36–L40, 2010. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010MNRAS.403L..36S>.

SMITH, R. J. et al. A giant elliptical galaxy with a lightweight initial mass function†. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 434, n. 3, p. 1964–1977, 07 2013. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1141>.

SPINIELLO, C. et al. INSPIRE: INvestigating stellar population in RElics. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 654, p. A136, oct 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1051%2F0004-6361%2F202140856>.

- STRUBLE, M. F. et al. "morphological classification/ revised rs/ of abell clusters in d less than or equal to 4 and an analysis of observed correlations.". **The Astronomical Journal**, v. 87, p. 7–46, jan. 1982. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982AJ.....87....7S>.
- TEGMARK, M. et al. How small were the first cosmological objects? **The Astrophysical Journal**, v. 474, p. 1, 1997.
- THRONSON, H. A. J. et al. Star formation in active dwarf galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 311, p. 98–112, dez. 1986. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1986ApJ...311...98T>.
- 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, 05 2010. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16407.x>.
- VILLAUME, A. et al. New Constraints on Early-type Galaxy Assembly from Spectroscopic Metallicities of Globular Clusters in M87. **The Astrophysical Journal**, v. 879, n. 1, p. 45, jul. 2019. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...879...45V>.
- VOGGEL, K. T. et al. A gaia-based catalog of candidate stripped nuclei and luminous globular clusters in the halo of centaurus a. **The Astrophysical Journal**, The American Astronomical Society, v. 899, n. 2, p. 140, aug 2020. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab6f69>.
- WEHNER, E. M. H. et al. The globular cluster systems around ngc 3311 and ngc 3309. **The Astrophysical Journal**, v. 681, n. 2, p. 1233, jul 2008. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/587433>.
- WEHNER, E. M. H. et al. The Globular Cluster Systems around NGC 3311 and NGC 3309. **The Astrophysical Journal**, v. 681, n. 2, p. 1233–1247, jul. 2008. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...681.1233W>.
- WHITE, S. D. M. et al. Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 183, n. 3, p. 341–358, 1978. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978MNRAS.183..341W>.
- YOON, S.-J. et al. Explaining the color distributions of globular cluster systems in elliptical galaxies. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 311, n. 5764, p. 1129–1132, fev. 2006. ISSN 1095-9203. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1122294>.
- ZANATTA, E. J. B. et al. Chromodynamical analysis of lenticular galaxies using globular clusters and planetary nebulae. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 479, n. 4, p. 5124–5135, 07 2018. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1737>.

## .1 Apêndice A - Press Release

Em algum momento em sua vida, você já olhou o céu noturno e se perguntou o que são todos aqueles pontos no céu? Muito provavelmente fez isso, principalmente na sua infância. E se em algum momento você teve a oportunidade de olhar esse mesmo céu noturno utilizando algum telescópio, provavelmente você pode ter conseguido ver as crateras que existem na nossa Lua, ou mesmo as suas de Júpiter ou os anéis de Saturno, mas você já se perguntou o que mais pode ser visto com auxílio de um telescópio? Bom, vamos falar um pouco sobre.

Grandes estruturas que existem no universo são chamadas de Aglomerados de Galáxias, elas nada mais são que muitas galáxias interligadas gravitacionalmente (sim, a gravidade é algo fundamental em todo o universo, não apenas para nos manter presos ao chão). Mas o que são galáxias, você deve se perguntar? São estruturas formadas de muitas estrelas, poeira cósmica, gás, e matéria escura (um tipo de matéria que não vemos, mas interage com o universo através da gravidade), e sabe o mais curioso? Tem pouco mais de um século que descobrimos a existência delas, pois até o momento não tínhamos equipamentos bons o suficiente para isso.

E galáxias existem de muitas formas e formatos, podem ser grandes, gigantes, medianas, espirais, elípticas (algumas até chamamos de águas vivas, mas isso é conversa para outro momento). O que a maioria das galáxias, tem em comum? Ao seu redor orbitam Aglomerados de Estrelas, e também tem de alguns formatos, mas gostaria de te contar um pouco sobre os que são em formato globular.

Os Aglomerados Globulares (GCs) são um conjunto de estrelas, pequeno se comparado ao tamanho de uma galáxia, porém grande o suficiente para um telescópio como o Telescópio Espacial Hubble (HST) enxergar a uma certa distância. E é legal falar sobre isso, pois, esses aglomerados podem nos ajudar a entender melhor a galáxia que eles orbitam, pois o histórico de como eles se formaram está muitas vezes ligados a própria galáxia.

As galáxias ultra compactas anãs são maiores que os GCs, porém menores que uma galáxia anã, e o brilho delas e suas cores são muito parecidas. Como esses objetos surgiram ainda é uma incógnita, existindo duas possibilidades: uma é que são GCs muito grandes, e a outra é que são núcleos de galáxias anãs que se aproximaram de uma galáxia maior assim perderam a parte externa, sobrando apenas isso.

A galáxia de nome ESO 325-G004, que podemos ver na figura 30, se encontra no centro de um aglomerado de galáxias e foi o alvo desse projeto de Mestrado em Astrofísica, realizado no Instituto de Física da UFRGS, por Weligton Nogueira. Utilizando um catálogo obtido a partir de dados do HST, de candidatos a aglomerados globulares e galáxias anãs ultra compactas, que possivelmente se encontram em órbita da nossa galáxia de estudo, verificamos algumas propriedades de alguns desses objetos.

Para esse trabalho, utilizamos observações do Telescópio Gemini, onde tínhamos o

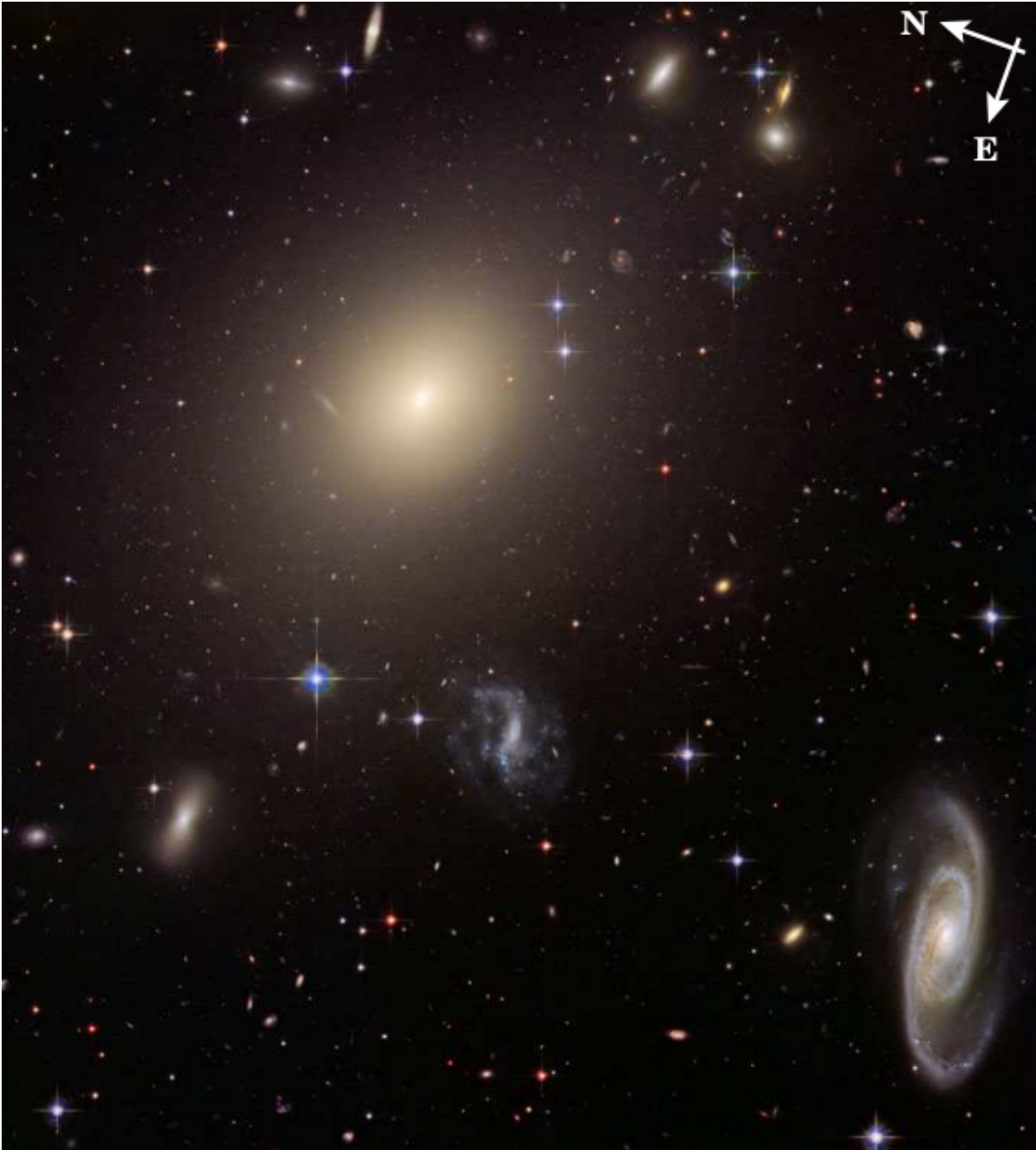


Figura 30 – Essa imagem nos mostra a ESO 325-G004, que é essa área que apresenta no centro mais luminoso. Imagem retirada do trabalho de (BLAKESLEE; DEGRAAFF, 2008)

espectro de vários objetos ao redor da ESO 325-G004. O intuito desse trabalho foi investigar a idade desses candidatos, a quantidade de metais presentes em sua composição, e mais algumas propriedades.

Ao final desse trabalho encontramos ao todo 14 desses objetos, sendo 7 deles candidatos a aglomerados globulares, e 7 deles com características que indicam que podem ser galáxias anãs ultra compactas. Esperamos fazer mais estudos sobre esse sistema futuramente, e utilizar os dados já existentes para determinar mais informações sobre a ESO 325-G004.