



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/04.30.15.45-TDI

## ESTUDO SOBRE A RELAÇÃO ENTRE O ESTÁGIO DINÂMICO DE AGLOMERADOS E OS PARÂMETROS DE POPULAÇÃO ESTELAR DE GALÁXIAS MEMBRO

Vitor Medeiros Sampaio

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Astrofísica,  
orientada pelo Dr. Reinaldo Ramos  
de Carvalho, aprovada em 15 de  
maio de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42DK8L2>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Gabinete do Diretor (GBDIR)  
Serviço de Informação e Documentação (SESID)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):****Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

**Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/04.30.15.45-TDI

## ESTUDO SOBRE A RELAÇÃO ENTRE O ESTÁGIO DINÂMICO DE AGLOMERADOS E OS PARÂMETROS DE POPULAÇÃO ESTELAR DE GALÁXIAS MEMBRO

Vitor Medeiros Sampaio

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Astrofísica,  
orientada pelo Dr. Reinaldo Ramos  
de Carvalho, aprovada em 15 de  
maio de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42DK8L2>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Sampaio, Vitor Medeiros.

Sa47e      Estudo sobre a relação entre o estágio dinâmico de aglomerados e os parâmetros de população estelar de galáxias membro / Vitor Medeiros Sampaio. – São José dos Campos : INPE, 2020.  
xxvi + 167 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/04.30.15.45-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientador : Dr. Reinaldo Ramos de Carvalho.

1. Cluster galáctico. 2. Evolução galáctica. 3. Formação estelar.  
4. Estrutura de grande escala do universo. I.Título.

CDU 524.62

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Vitor Medeiros Sampaio**

Título: "ESTUDO SOBRE RELAÇÃO ENTRE O ESTÁGIO DINÂMICO DE AGLOMERADOS E OS PARÂMETROS DE POPULAÇÃO ESTELAR DE GALÁXIAS MEMBRO"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Astrofísica**

Dr. Oswaldo Duarte Miranda

Oswaldo Duarte Miranda

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Reinaldo Ramos de Carvalho

P/ Oswaldo Duarte Miranda

Orientador(a) / UNICID / São Paulo - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Carlos Alexandre Wuensche de Souza

P/ Oswaldo Duarte Miranda

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Andre Ribeiro

P/ Oswaldo Duarte Miranda

Convidado(a) / UESC / Ilhéus - BA

Participação por Video - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade



*“Bring forward what is true, write it so that it is clear, defend it to your last breath!”*

LUDWIG EDWARD BOLTZMANN



*À minha mãe Valéria, meu pai Mário e meu irmão  
Eduardo*



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer minha mãe Valéria, meu pai Mário e meu irmão Eduardo por nunca duvidarem e sempre me permitirem seguir meu sonho de ser um cosmólogo renomado. Além disso, foram vocês quem me apoiaram no meus piores momentos. Obrigado. Especialmente meu irmão, ao qual daria minha vida por. Agradeço à minha avó, Neide, por ter me criado com tanto carinho e afeto. Sem a senhora eu não seria nada do que sou hoje.

Gostaria de agradecer aos meus amigos Cristiano, Felipe e Luís Felipe, que, por mais que a distância tenha aumentado, continuam sendo irmãos para mim. Grandes histórias, gargalhadas e momentos foram em suas companhias. Que muitas ainda estejam por vir.

Gostaria de agradecer meus amigos do INPE Adriany, Hadassa, Giorgio e Ana Luiza. Minha estadia em São José dos Campos me proporcionou conhecer cada um de vocês, sendo que agora minha pessoa carrega uma pequena parte de vocês dentro de mim. Agradeço também a minha amiga Micheli por sempre me apoiar, tenho certeza que você será uma pesquisadora incrível.

Agradeço ao meu orientador Reinaldo, que, desde a graduação, acreditou no meu potencial para ser um bom pesquisador. A estrada como pesquisador é árdua, aprendi muitas lições e hoje posso afirmar que aperfeiçoei-me. Espero poder algum dia ser um pouco do pesquisador que você é. Para isso, claro, devo diminuir as “Vitorisses”. Gostaria também de agradecer ao Sandro por toda ajuda sobre Python durante todo o mestrado.

Gostaria de agradecer o Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa garantida durante todo meu mestrado. Ao INPE pelas instalações e o ambiente proporcionado para o desenvolvimento desse trabalho.

De forma geral, gostaria de agradecer a todas as pessoas que têm algum sentimento amistoso quanto a minha pessoa, que me ajudaram quando precisei e/ou acreditam em meu potencial. Por último, gostaria de fazer um agradecimento a uma coisa inanimada, um conceito abstrato: a música. Minha vida seria completamente sem sentido na ausência dessa arte.



## RESUMO

Neste trabalho, estudamos a correlação entre o estado dinâmico de aglomerados de galáxias e o histórico de formação estelar das galáxias membro. Nosso estudo é baseado em uma amostra de 177 aglomerados definidos a partir do catálogo de Yang, localizados em  $0.03 \leq z \leq 0.1$  e massas do halo de matéria escura superiores a  $10^{14}M_{\odot}$ . Dividimos a amostra de acordo com a gaussianidade da distribuição de velocidades de galáxias membro e encontramos diferenças entre aqueles que apresentam uma distribuição de velocidades gaussiana (G) e não-gaussiana (NG). Investigamos as populações estelares de galáxias em aglomerados G e NG de acordo com o tempo de “infall” ( $t_{\text{inf}}$ ) e regime de luminosidade. Notamos que galáxias na região de alto  $t_{\text{inf}}$  de aglomerados NG apresentam Idade e Metalicidade menores do que sua contraparte em sistemas G, o que favorece o cenário de que aglomerados NG sofreram sua última grande fusão mais recentemente do que sistemas G. Encontramos também evidências de uma maior taxa de acreção de galáxias pré processadas, provavelmente provenientes de filamentos, em aglomerados NG. Estimamos que em aglomerados NG a acreção é de  $M_{\text{estelar}} \sim 10^{12}M_{\odot}/\text{Ga}$ . Estes resultados são coerentes com o cenário no qual aglomerados G e NG encontram-se em diferentes estágios dinâmicos e reforçam a validade da gaussianidade da distribuição de velocidades como método para caracterizar o equilíbrio dinâmico de aglomerados. Examinamos também a utilização da distância entre os centros óptico e em raios X,  $d_{\text{opt,rx}}$ , para definir duas famílias de aglomerados em diferentes estágios dinâmicos e encontramos que este parâmetro também define sistemas com propriedades significativamente distintas. As diferenças encontradas são coerentes com as encontradas no caso G vs NG e indicam que aglomerados com maior  $d_{\text{opt,rx}}$  apresentam uma maior taxa de galáxias pré-processadas. Notamos que as diferenças encontradas no caso G vs NG foram ainda mais significativas quando a divisão foi feita por meio de  $d_{\text{opt,rx}}$ , o que indica que este parâmetro define conjuntos em estágios dinâmicos distintos de forma mais robusta.

Palavras-chave: cluster galáctico. evolução galáctica. formação estelar. estrutura de grande escala do universo.



# INVESTIGATING THE RELATION BETWEEN DYNAMICAL STATE OF CLUSTERS AND STELLAR POPULATION PARAMETERS OF MEMBERS GALAXIES

## ABSTRACT

In this work, we study the correlation between the dynamic state of galaxy clusters and the star formation history of member galaxies. Our study is based on a sample of 177 clusters defined from the Yang catalog. Our sample covers the redshift range  $0.03 \leq z \leq 0.1$  and halo masses greater than  $10^{14}M_{\odot}$ . We divide the sample accordingly to the gaussianity of the velocity distribution of member galaxies and find differences between those with a Gaussian velocity distribution (G) and non-Gaussian distribution (NG). We note that galaxies in the high  $t_{\text{inf}}$  zone of NG clusters have a lower Age and Metallicity than their counterpart in G systems, which favors the scenario that NG clusters have undergone their last major merger more recently than G systems. We find evidence of a higher infall rate of pre-processed galaxies in NG clusters, probably from low-density filaments. We estimate an infall rate of  $M_{\text{stellar}} \sim 10^{12}M_{\odot}/\text{Gyr}$  in NG clusters. These results indicate that G and NG clusters are in different dynamical stages and support the gaussianity of the velocity distribution as a method to characterize the dynamical state of clusters of galaxies. We also examine the use of the distance between optical and X ray centers,  $d_{\text{opt,rx}}$ , to investigate two groups of clusters possibly in different dynamical stages. We find that this parameter also separates two families of systems with significantly different properties. The differences found are consistent with those found in the case G vs NG and indicate that clusters with higher  $d_{\text{opt,rx}}$  have a higher infall rate of pre-processed galaxies. We note that the differences found in the case G vs NG are even more highlighted by the use of  $d_{\text{opt,rx}}$ , which favors  $d_{\text{opt,rx}}$  as a more robust method to define the dynamical stage of clusters of galaxies.

Keywords: galactic clusters. galactic evolution. star formation. large-scale structure of the universe.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Mapa de densidade de galáxias no diagrama cor u-r x massa estelar. A cor já está corrigida quanto a efeitos da poeira. . . . .	9
1.2 Galáxia NGC 4402 sob o efeito da pressão de arraste na medida que se move em direção ao centro do aglomerado de Virgo. . . . .	10
1.3 Imagem da galáxia ESO 137-001 captado pelo experimento HSP WFCP3.	11
1.4 Ilustração de um limiar na densidade do MIA para que aconteça o efeito de pressão de arraste. . . . .	13
1.5 A trajetória de uma galáxia se movendo na direção do aglomerado, vista na representação do EFP. . . . .	18
2.1 Comparativo das galáxias definidas nos catálogos de Yang (círculos vermelhos) e de Carvalho (x azul). São mostrados os casos do aglomerados Yang 002 (esquerda) e Yang 004 (direita). Destacamos também para cada aglomerado a galáxia mais massiva (“central”) de acordo com Yang et al. (2007). . . . .	24
2.2 Performance do programa MClust em identificar bimodalidade em um conjunto de dados gerados com diversos parâmetros sendo variados: número de pontos, proporção entre os modos (de 0.5 a 0.9 em passos de 0.1) e relação entre os desvios padrão. . . . .	28
2.3 Semelhante à figura 2.2, mas para o método da Distância de Hellinger. . . . .	30
2.4 Calibração da DH com relação ao número de pontos presente na distribuição analisada. . . . .	31
2.5 Histogramas de magnitude absoluta e massado virial para as duas amostras.	33
3.1 Regiões de Rhee. . . . .	38
3.2 Regiões definidas em Pasquali et al. (2019) . . . . .	41
3.3 Distribuições dos parâmetros de população estelar . . . . .	44
3.4 Distribuições dos parâmetros de população estelar na região do virial e de “infall” . . . . .	46
3.5 Semelhante a Figura 3.4, mas para galáxias de BF. . . . .	47
3.6 Valores médios de Idade (esquerda), $[Z/H]$ (meio) e $M_{\text{estelar}}$ (direita) de galáxias em aglomerados G e NG para cada região de Rhee, separados de acordo com o regime de magnitude. Em verde ressaltamos os parâmetros representativos de galáxias na região A. . . . .	50

3.7	Valores médios de Idade (esquerda), $[Z/H]$ (meio) e $M_{\text{estelar}}$ (direita) de galáxias em aglomerados G e NG para cada NZP, separados de acordo com o regime de magnitude. . . . .	53
3.8	Mapa de Idade (painéis superiores), $[Z/H]$ (centrais) e $M_{\text{estelar}}$ (inferiores) para o EFP de aglomerados G (esquerda) e NG (direita). . . . .	55
3.9	Semelhante à Figura 3.8, mas para o regime de BF. As escalas são mantidas iguais, excetuando $M_{\text{estelar}}$ , a qual mantivemos o mesmo intervalo, porém em ordem de grandeza diferente. . . . .	56
3.10	Histograma da distância entre o centro óptico e de raios X para a Amostra 2 (esquerda) e separando em aglomerados G e NG (direita). . . . .	58
3.11	Semelhante à Figura 3.3, mas para o caso de aglomerados $d_{400-}$ e $d_{400+}$ . . . . .	60
3.12	Semelhante à Figura 3.12, mas para aglomerados $d_{400-}$ e $d_{400+}$ . . . . .	62
3.13	Semelhante à figura 3.12, mas para galáxias de BF. . . . .	63
3.14	Semelhante à Figura 3.7, mas para aglomerados $d_{400-}$ e $d_{400+}$ . . . . .	67
4.1	Mapa esquemático dos principais resultados e conclusões quanto a comparação entre aglomerados G e NG. . . . .	74
4.2	Mapa esquemático dos principais resultados e conclusões quanto a comparação entre aglomerados $d_{400-}$ e $d_{400+}$ . . . . .	75
4.3	Dois exemplos do processo de clustering aplicado ao espaço de TFEE por Idade (esquerda) e traduzido para o EFP (direita). . . . .	78
A.1	Comparação entre galáxias dos dois catálogos. . . . .	89
B.1	Análise do espaço AR vs DEC dos aglomerados da amostra 2. . . . .	120
C.1	Análise do espaço AR vs DEC para o aglomerados Yang 414. . . . .	152
C.2	Análise do espaço AR vs DEC para o aglomerado Yang 427 . . . . .	153
C.3	Análise do espaço AR vs DEC para o aglomerado Yang 183 . . . . .	154
D.1	Distribuição de Idade da população estelar de galáxias de aglomerados $d_{400+}$ e $d_{400-}$ , apresentada em mais detalhes na Seção 3.5. . . . .	157
F.1	EFP para o aglomerado Yang 005. Esquerda: utilizando o centro óptico; Direita: utilizando o centro de raios X. Este aglomerado é classificado como NG, segundo dC17. A linha pontilhada representa a velocidade de escape do sistema. . . . .	162
F.2	Semelhante a Figura F.1, mas para o aglomerado Yang 008. Este aglomerado é classificado como G segundo dC17. . . . .	162
G.1	Estudo do espaço RA vs DEC para o aglomerado Yang 005. . . . .	166

G.2 Os mesmo painéis apresentados na Figura G.1, mas para o aglomerado Yang 008. Nesse caso não há dados provenientes do levantamento XMM-Newton disponíveis. . . . .	167
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 O tempo médio de infall e o desvio padrão (calculado a partir de quartis da distribuição) para cada NZP. . . . .	41
3.2 A porcentagem de galáxias em aglomerados G e NG na região A, para ambos os regimes de magnitude. . . . .	43
3.3 Porcentagem de ocupação das regiões de Rhee e valores médios de Idade, $[Z/H]$ e $M_{\text{estelar}}$ . Os resultados são dividido entre galáxias em aglomerados G e NG e de acordo com o regime de magnitude. Em verde destacamos os parâmetros de população estelar resultantes da análise de galáxias na região A, associada a regiões de baixa densidade. . . . .	49
3.4 Porcentagem e Idade, $[Z/H]$ e $M_{\text{estelar}}$ médias de galáxias encontradas em cada NZP. Os resultados são divididos entre galáxias em aglomerados G e NG e de acordo com o regime de magnitude. . . . .	52
3.5 Semelhante a Tabela 3.3, mas para a divisão do EFP por meio de NZPs.	66



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIA	–	Meio Intra-Aglomerado
EAB	–	Equação Acolisional de Boltzmann
TFE	–	Taxa de Formação Estelar
TFEE	–	Taxa de Formação Estelar Específica
SV	–	Sequência Vermelha
NA	–	Nuvem Azul
VV	–	Vale Verde
PTFE	–	Processos de Truncamento da Formação Estelar
NAG	–	Núcleos Ativos de Galáxias
CO	–	Monóxido de Carbono
Ga	–	Giga anos
aglomerados G	–	aglomerados com distribuição de velocidade gaussiana
aglomerados NG	–	aglomerados com distribuição de velocidade não-gaussiana
MDPL2	–	simulação MultiDark Planck 2
Mpc	–	Mega Parsec
Teste AD	–	Teste de Anderson-Darling
EFP	–	Espaço de Fase Projetado
perfil NFW	–	perfil de Navarro-Frenk-White
SDSS	–	Sloan Digital Sky Survey
NYU-VAGC	–	New York University Value-Added Galaxy Catalogue
MCXC	–	Meta-Catalogue of X-ray detected Clusters of Galaxies
ROSAT	–	ROSAT X-Ray All Sky Survey
XMM-Newton	–	X-ray Multi Mirror Mission
Chandra	–	Chandra X-ray Observatory
NORAS	–	Northern Rosat All-Sky
REFLEX	–	ROSAT-ESO Flux Limited X-ray
BCS	–	Brightest Cluster Sample
eBCS	–	extended Brightest Cluster Sample
SGP	–	South Galactic Pole
NEP	–	North Ecliptic Pole
MACS	–	Massive Cluster Survey
CIZA	–	Clusters In The Zone of Avoidance
160SD	–	160 Square Degree ROSAT Cluster Survey
400SD	–	400 Square Degree ROSAT PSPC Cluster Survey
SHARC	–	Southern Serendipitous High-Redshift Archival ROSAT Cluster Survey
WARPS	–	Wide Angle ROSAT Pointed Survey
EMSS	–	Einstein Medium Sensitivity Survey
ESZ	–	Planck Early Sunyaev-Zeldovich
HIFLUGCS	–	Highest X-ray Flux Galaxy Cluster Sample
AF	–	Alto Fluxo

BF	–	Baixo Fluxo
PES	–	População Estelar Singular
MILES	–	Medium Resolution INT Library of Empirical Spectra
CIB	–	Critério de Inferência Bayesiana
DH	–	Distância de Hellinger
AR	–	Ascensão Reta
DEC	–	Declinação
NZP	–	New Zones de Pasquali et al [2018]
EFPS	–	Espaço de Fase Projetado Superposto
ACP	–	Análise de Componente Principal

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G$	– constante de gravitação universal
$\rho$	– densidade
$M_{\odot}$	– Massa Solar, $\approx 1.989 \times 10^{31}$ kg
$c_s$	– velocidade do som
$c$	– velocidade da luz no vácuo
$\lambda_J$	– Comprimento de Jeans
$\epsilon$	– densidade de energia
$t_{\text{din}}$	– tempo dinâmico característico
$t_{\text{relax}}$	– tempo de relaxação
$V_0$	– voltagem inicial
$R$	– raio característico da estrutura
$t_{\text{cr}}$	– tempo de cruzamento
$\Phi$	– potencial gravitacional
$\sigma$	– dispersão de velocidade
$t_{\text{rv}}$	– escala de tempo do processo de relaxação violenta
$t_{\text{ql}}$	– tempo de queda-livre
$\Sigma$	– densidade superficial
$g_{\text{ME}}$	– máxima aceleração gravitacional restauradora para matéria escura
$g_{\text{d},*}$	– máxima aceleração gravitacional restauradora para o disco estelar
$g_{\text{b}}$	– máxima aceleração gravitacional restauradora para o bojo
$g_{\text{HI}}$	– máxima aceleração gravitacional restauradora para o gás atômico
$g_{\text{H2}}$	– máxima aceleração gravitacional restauradora para o gás molecular
$z$	– redshift
$z_{\text{agl}}$	– redshift do centro do aglomerado
$\zeta$	– direção perpendicular a componente disco
$t_{\text{TFE}}$	– tempo característico para o truncamento da formação estelar
$R_{\text{vir}}$	– raio do virial
$R_{200}$	– raio no qual a densidade é 200 vezes a densidade média do campo geral
$M_{200}$	– massa total dentro de um volume de tamanho característico igual a $R_{200}$
$\mu_i$	– média da $i$ -ésima gaussiana
$\sigma_i$	– desvio padrão da $i$ -ésima gaussiana
$\pi_i$	– peso da $i$ -ésima gaussiana
$N_{\text{max}}$	– número máximo de componentes
$\delta$	– distância entre dois modos gaussianos
$c_{\text{opt}}$	– centro óptico
$c_{\text{rx}}$	– centro em raios X
$M_{\text{r}}$	– magnitude absoluta
$\alpha$	– limite de significância
$H_0$	– constante de Hubble
$\Omega_{\text{M}}$	– fração da densidade de energia na forma de matéria em um universo plano

$\Omega_\Lambda$	–	fração da densidade de energia na forma de energia escura em um universo plano
$d_{\text{opt,rx}}$	–	distância entre o centro óptico e o centro em raios X
$d_A$	–	distância de diâmetro angular
$\chi$	–	distância angular
$v_{\text{LVD}}$	–	velocidade projetada ao longo da linha de visada
$t_{\text{inf}}$	–	tempo de “infall”
$f_{\text{PM}}$	–	fração de perda de massa
$d_{400-}$	–	aglomerados com $d_{\text{opt,rx}}$ menor ou igual a 400 kpc
$d_{400+}$	–	aglomerados com $d_{\text{opt,rx}}$ maior que 400 kpc

# SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 As estruturas do universo . . . . .	1
1.2 Estado de equilíbrio de um sistema gravitacional . . . . .	4
1.2.1 Relaxação de dois corpos . . . . .	4
1.2.2 A evolução do sistema no espaço de fase . . . . .	5
1.2.3 O processo de mistura de fases . . . . .	6
1.2.4 Relaxação violenta . . . . .	6
1.3 Fatores externos em ação: nature vs nurture . . . . .	7
1.4 Processos que interrompem a formação estelar . . . . .	8
1.5 Galáxias em aglomerados . . . . .	10
1.6 Dinâmica caracterizada pela distribuição de velocidades . . . . .	13
1.7 Limitações no método da distribuição de velocidades . . . . .	15
1.8 Caracterização de diferentes populações galácticas no espaço de fase pro- jetado . . . . .	17
1.9 O papel das simulações cosmológicas . . . . .	18
1.10 Proposta deste trabalho . . . . .	19
<b>2 AMOSTRA, DADOS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>21</b>
2.1 Catálogo de Yang . . . . .	21
2.2 Dados em raios X . . . . .	22
2.3 Uso e redefinição do catálogo de Yang . . . . .	23
2.4 Estimativa dos parâmetros de população estelar . . . . .	24
2.5 Classificação do estágio dinâmico do aglomerado . . . . .	25
2.5.1 MClust . . . . .	26
2.5.2 Distância de Hellinger . . . . .	27
2.6 Definição do centro do aglomerado . . . . .	32
2.7 Caracterização da amostra de 62 aglomerados . . . . .	32
<b>3 RESULTADOS</b> . . . . .	<b>35</b>
3.1 Definição do espaço de fase projetado . . . . .	36
3.1.1 Estudo do espaço de fase projetado de acordo com Rhee et al. (2017) .	37
3.1.2 Três outras formas de dividir o espaço de fase projetado: Pasquali et al. (2018) . . . . .	39

3.2	Aglomerados em diferentes estágios dinâmicos . . . . .	42
3.3	Virial vs “Infall” . . . . .	43
3.4	Caracterização de regiões específicas do EFP de aglomerados G e NG . . . . .	48
3.4.1	O EFP dividido à la Rhee . . . . .	48
3.4.2	O EFP dividido em New Zones de Pasquali . . . . .	49
3.5	A distância entre os centros óptico e em raios X como medida do estágio dinâmico . . . . .	57
3.5.1	Separação dos aglomerados de acordo com $d_{opt,rx}$ . . . . .	57
3.5.2	Regiões de virialização e Infall de aglomerados $d_{400-}$ e $d_{400+}$ . . . . .	61
3.5.3	Regiões específicas do EFP de aglomerados com diferentes $d_{opt,rx}$ . . . . .	64
3.6	Discussão: o que essas tendências significam fisicamente? . . . . .	67
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRÓXIMAS ETAPAS . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE A - GALÁXIAS EM CADA CATÁLOGO . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICE B - ANÁLISE DO ESPAÇO AR VS DEC DE AGLOMERADOS DA AMOSTRA 2 . . . . .</b>	<b>119</b>
	<b>APÊNDICE C - AGLOMERADOS COM CARACTERÍSTICAS ATÍPICAS NO ESPAÇO AR VS DEC . . . . .</b>	<b>151</b>
C.1	Yang 414 e Yang 427 - interação entre grupos . . . . .	151
C.2	Yang 183 - limitado pela região do céu observada pelo levantamento SDSS152	
	<b>APÊNDICE D - A VALIDAÇÃO DE RESULTADOS POR MEIO DO P-VALUE NA ASTRONOMIA . . . . .</b>	<b>155</b>
	<b>APÊNDICE E - CÁLCULO DA VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS ANALISADOS . . . . .</b>	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE F - INFLUÊNCIA DO CENTRO NO ESPAÇO DE FASE . . . . .</b>	<b>161</b>
	<b>APÊNDICE G - USO DE <math>d_{opt,rx}</math> COMO PARÂMETRO DE SEPARAÇÃO DE DOIS CONJUNTOS DE AGLOMERADOS . . . . .</b>	<b>165</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Aglomerados de galáxias são as maiores estruturas ligadas observáveis do universo, sendo compostos por dezenas, centenas, ou até milhares de galáxias mantidas gravitacionalmente. Nestes sistemas, somente uma pequena fração de matéria encontra-se na forma de galáxias, sendo as maiores contribuições provenientes da matéria escura ( $\sim 85\%$  do total) e do gás quente presente no meio intra-aglomerado (MIA, Intra-cluster Medium) ( $\sim 10\%$ ). Aglomerados são estruturas que apresentam diferentes regimes de densidade e dispersão de velocidade, quantidades importantes na determinação de quanto o ambiente pode alterar as características físicas de uma galáxia membro do sistema.

Neste capítulo, apresentamos o contexto geral sobre a formação de aglomerados no universo. Discutimos as condições necessárias para que uma região de alta densidade colapse e vire um aglomerado. Desde a sua formação, diversos fenômenos físicos são responsáveis por levar a estrutura como um todo até o estado de equilíbrio dinâmico, sendo aqui abordados os principais. Apresentamos resultados recentes, que procuram estabelecer a relação entre o estágio dinâmico de aglomerados e os parâmetros de população estelar das galáxias membro. Discutimos também a importância de resultados provenientes de simulações cosmológicas no estudo do efeito do meio intra-aglomerado na evolução de galáxias. Como parte fundamental deste trabalho, apresentamos trabalhos recentes relacionando o estágio de equilíbrio dinâmico do aglomerado com a gaussianidade da distribuição de velocidades das galáxias membro. Finalmente, explicitamos os principais objetivos deste trabalho, onde propomos uma análise que considera o espaço de fase projetado e suas diferentes regiões específicas definidas a partir de simulações.

## 1.1 As estruturas do universo

A evolução do universo com relação a expansão e evolução de estruturas é caracterizada pela componente que domina a densidade de energia em cada época. Radiação, energia escura e matéria (escura e bariônica) são as três formas de energia encontradas no universo. No modelo atual, o universo primordial era dominado por radiação, seguido por uma época dominada por matéria e posteriormente pela energia escura. Atualmente,  $\sim 75\%$  da densidade de energia do universo está na forma de energia escura,  $\sim 25\%$  na forma de matéria e um percentual desprezível de  $\sim 10^{-3}\%$  na forma de radiação. A componente de matéria é dividida em  $\sim 21\%$  na forma de matéria escura e  $\sim 4\%$  na forma de matéria bariônica. Dois cenários de formação de estrutura foram propostos até então: um onde estruturas maiores dão origem a

estruturas menores por fragmentação (“top-bottom”, de cima para baixo); e outro no qual as estruturas menores são formadas e, por coalescência, formam as maiores (“bottom-top”, de baixo para cima). Atualmente, o segundo cenário é favorecido por evidências observacionais.

No universo, as estruturas são organizadas de forma hierárquica. A Lua é um satélite da Terra, que por sua vez está orbitando em torno do Sol com outros 7 planetas, formando assim o Sistema Solar, o qual faz parte da Via Láctea - um conjunto de estrelas ligadas gravitacionalmente. Nossa Galáxia, por sua vez, pertence a um conjunto conhecido como Grupo Local ( $10^{12}M_{\odot}$ ) e assim as estruturas seguem uma hierarquia até aglomerados com massa da ordem de  $10^{15}M_{\odot}$ . Variações estruturais nestes sistemas acontecem em escalas de tempo extremamente longas ( $\sim 10^9$  anos). O universo, por sua vez, tem sua idade estimada em  $H_0^{-1} \sim 13.7$  Ga ( $1\text{Ga} = 10^9$  anos). Dessa forma, o estudo do equilíbrio dinâmico de aglomerados é tema de difícil solução, uma vez que perturbações no sistema levam um tempo comparável a idade do universo para serem incorporadas <sup>1</sup>.

Gravitação é a interação dominante nas escalas de aglomerados e atua desde sua formação e evolução subsequente. Três propriedades deste tipo de interação, são fundamentais:

---

<sup>1</sup>O termo incorporada aqui é utilizado no sentido de que o sistema evoluiu tempo o suficiente sob a ação de processos de relaxação para atingir um estado de equilíbrio.

- é exclusivamente atrativa. Não existe gravidade separando objetos;
- possui um alcance infinito. Nossa Galáxia sente a atração de toda e qualquer galáxia do universo. Todavia, a dependência da força com o inverso do quadrado da distância torna o efeito desprezível;
- um pequeno desvio do equilíbrio de um sistema gravitacional é suficiente para que a gravitação inicie o colapso novamente;

A distribuição de matéria no universo pode ser caracterizada por um campo escalar de densidade. Devido à natureza exclusivamente atrativa da interação gravitacional, regiões onde a densidade é maior do que a média do campo tendem a acretar matéria. Isso aumenta gradualmente a diferença com relação à média, dando início a formação de uma estrutura. No entanto, esse colapso não acontece de maneira indefinida. Num sistema dinâmico geral, as partículas evoluem em direção ao equilíbrio hidrostático, definido pela equação

$$\frac{dP}{dr} + \frac{GM\rho(r)}{r^2} = 0 \quad (1.1)$$

onde  $P$  é a pressão existente na região descrita em função da distância ao centro,  $r$ ;  $G$  é a constante de gravitação universal e  $\rho(r)$  é a densidade em função de  $r$ . A Equação 1.1 implica que o gradiente de pressão do sistema deve equilibrar a atração gravitacional para que o colapso não ocorra. Assim, regiões nas quais o colapso acontece antes do gradiente de pressão se estabelecer, são as que constituem a estrutura em grande escala que observamos. Define-se, então, um critério para o colapso denominado Comprimento de Jeans (JEANS, 1901). Como variações na pressão são propagadas com a velocidade do som no meio, a imposição de que o gradiente se forme antes do colapso resulta na equação

$$\lambda_J = c_s \left( \frac{\pi c^2}{G\bar{\epsilon}} \right)^{\frac{1}{2}} = 2\pi c_s t_{\text{din}} \quad (1.2)$$

onde  $c_s$  é a velocidade do som no meio,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $\bar{\epsilon}$  é a densidade de energia média local e  $t_{\text{din}}$  é o tempo dinâmico para o colapso. Regiões onde o comprimento da perturbação em densidade é maior que o comprimento de Jeans tendem ao colapso, enquanto que perturbações menores fariam o sistema oscilar devido a atuação dos termos de gravitação e pressão.

## 1.2 Estado de equilíbrio de um sistema gravitacional

Aglomerados de galáxias têm sua evolução dinâmica regida pelo princípio de minimização de energia. Neste caso, o sistema evolui temporalmente em direção à configuração de menor energia total. Assim, é de importância fundamental para sistemas de N-corpos entender o peso relativo que as colisões têm nas interações entre os membros do sistema. Temos que a aceleração de uma dada galáxia será determinada pelo gradiente do potencial gravitacional do sistema. As integrais de movimento então definem uma órbita em termos da posição e velocidade inicial. A órbita real será diferente da órbita teórica devido às colisões que a galáxia sofre ao longo do tempo. Contudo, utilizando uma aproximação quasi-estática, em um dado intervalo de tempo,  $t_{\text{relax}}$  (Tempo de Relaxação), a aceleração da galáxia é descrita pelo gradiente do potencial com uma integral de energia bem definida. De forma objetiva,  $t_{\text{relax}}$  quantifica a importância de efeitos acumulativos de colisões no sistema. Quanto maior este tempo, menor é o efeito das colisões e portanto vale a aproximação quasi-estática.

Os processos físicos responsáveis por levar o sistema ao estado de equilíbrio dinâmico são conhecidos como processos de relaxação. Cada sistema possui suas características de relaxação própria. Em um exemplo, a voltagem em função do tempo em um circuito RC<sup>2</sup> é descrito por  $V(t) = V_0 \exp^{-\frac{t}{t_{\text{relax}}}}$ , onde  $V_0$  é a voltagem inicial do sistema. Nesse caso, a diminuição de energia no sistema acontece devido a dissipação no resistor. Note que pela equação anterior,  $t_{\text{relax}}$  atua como uma escala de tempo para esse processo. Outros processos, todavia, acontecem para estruturas nas quais a força gravitacional tem papel pivotal. Estes são apresentados a seguir.

### 1.2.1 Relaxação de dois corpos

Em primeira aproximação, uma galáxia dentro de um aglomerado experimenta encontros com outras galáxias e, apesar de não haver colisão direta, a variação na energia orbital traduz-se em uma variação de momentum linear e angular da mesma. Apesar de pequeno, esse efeito torna-se acumulativo quando considerados sistemas de N-corpos. Da definição de tempo de relaxação, temos que o regime quasi-estático não é aplicável quando temos uma brusca variação em velocidade, por exemplo. É usual, então, impor uma variação da ordem da própria velocidade ( $\Delta v \approx v$ ) para estimar o tempo de relaxação. Assim, considerando encontros, dois a dois, dentro

---

<sup>2</sup>Circuito Resistor-Capacitor

de um aglomerado de galáxias, temos que  $t_{\text{relax}}$  é estimado como

$$t_{\text{relax}} = \frac{N}{6 \ln N} \frac{R}{v} = \frac{N}{6 \ln N} t_{\text{cr}}, \quad (1.3)$$

onde  $N$  é o número de membros no aglomerado,  $R$  é o raio característico da estrutura e  $v$  é a velocidade da galáxia no sistema. Importante ressaltar que a equação 1.3 surge ao assumirmos um estado virializado para o sistema, no qual energia potencial e cinética das galáxias membro estão relacionadas por uma constante. Essa equação implica que aglomerados com aproximadamente  $N \sim 100$  galáxias e tempo de cruzamento  $t_{\text{cr}} \sim 10^{10}$  anos tem um tempo de relaxação  $t_{\text{relax}} \sim 1.1 \times 10^{10}$  anos, comparável à idade do universo. Logo, o regime quasi-estático pode ser utilizado para aglomerados de galáxias até intervalos de tempo da ordem de 1 Ga. Além disso, é importante notar também que a escala característica de tempo para que a relaxação de dois corpos leve o sistema ao estágio de equilíbrio indica que outros mecanismos também devem ter atuado para a relaxação de sistemas que observamos atualmente.

### 1.2.2 A evolução do sistema no espaço de fase

Na descrição Lagrangeana do movimento de um sistema de partículas, a evolução temporal do mesmo é descrita por variações no denominado espaço de fase. Este é composto por 3 componentes espaciais (geralmente relacionadas ao potencial do sistema),  $\mathbf{r}$ , e 3 componentes de velocidade (relacionadas a energia cinética do sistema),  $\mathbf{v}$ . Assim, a evolução temporal das partículas consiste em trajetórias no espaço de fase. A evolução do sistema como um todo pode, então, ser descrito a partir de uma função avaliando a densidade numérica em pequenos volumes deste espaço. Denotamos, portanto,  $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$  a densidade numérica de objetos no cubo de lado infinitesimal  $d\mathbf{r}d\mathbf{v}$ , centrado na posição  $(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  no tempo  $t$ . Assim, a evolução do sistema pode ser descrita por uma equação em  $f$ . No caso de sistemas gravitacionalmente ligados, esta equação é chamada de Equação Acolisional de Boltzmann (EAB, “Collisionless Boltzmann Equation”) (GIBBONS, 1981),

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} - \nabla \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0 \quad (1.4)$$

onde  $\Phi = \Phi(\mathbf{r}, t)$  é o potencial gravitacional. Da Equação 1.4 verifica-se que, ao desprezar os efeitos de colisões dinâmicas, o sistema comporta-se como um fluido incompressível no espaço de fase. Para resolve-la, entretanto, uma descrição detalhada do potencial gravitacional é necessária. Dado o difícil acesso a tal detalhamento do potencial, é usual, então, considerar os diferentes momentos da equação em veloci-

dade. A equação de continuidade, por sua vez, resulta da expansão de ordem zero,

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} [n \langle v_i \rangle] = 0. \quad (1.5)$$

Essa equação expressa que o número de partículas no espaço de fase permanece constante. Algo esperado, já que estamos considerando o sistema como fechado. O estudo da trajetória de galáxias no espaço de fase quando submetidas ao potencial de um aglomerado tem no primeiro momento da EAB uma de suas bases. Denominada Equação de Jeans, esta limita as possíveis trajetórias da galáxia (BINNEY; TREMAINE, 2011) quando submetida ao potencial gravitacional do sistema,

$$-\frac{1}{n} \sum_i \frac{\partial (n \sigma_{i,j})}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = 0. \quad (1.6)$$

Uma das hipóteses necessárias para chegar à Equação 1.6 é a decomposição do tensor de velocidade,  $\langle v_i v_j \rangle$ , em duas componentes: uma relativa ao movimento coerente do sistema,  $\langle v_i \rangle \langle v_j \rangle$ , e uma segunda quantificando o movimento aleatório do sistema em relação ao movimento médio,  $\sigma_{i,j}$ . Assim, a evolução no espaço de fase de um sistema gravitacionalmente ligado é descrita pelas Equações 1.4 e 1.6.

### 1.2.3 O processo de mistura de fases

Um dos processos de relaxação em sistemas gravitacionais é denominado Mistura de Fases. Em decorrência do fato de diversas galáxias passarem por uma mesma região durante a evolução temporal de aglomerados, não existe uma clara diferenciação quanto a ocupação do espaço de fase. Com o tempo, galáxias em regiões específicas espalham-se por todo o espaço de fase, evoluindo para uma situação de homogeneidade. Ao atingir esta configuração, as variações na função  $f(\tilde{r}, \tilde{v}, t)$  no espaço de fase tornam-se desprezíveis, atingindo-se um estado onde  $df/dt \approx 0$ , denominado estado de equilíbrio dinâmico.

Duas propriedades importantes deste processo são: a) não existe nenhuma imposição a priori sobre a forma do potencial gravitacional do sistema; e b) a informação sobre a condição inicial de cada galáxia do aglomerado é perdida ao longo do processo.

### 1.2.4 Relaxação violenta

Ao considerar efeitos coletivos, Lynden-Bell (1967) descreve o processo de Relaxação Violenta, onde as variações do potencial gravitacional são da ordem do próprio

potencial ( $\Delta\Phi \sim \Phi$ ). A escala de tempo associada a esse processo é dada por

$$t_{\text{rv}} = \left\langle \frac{1}{\epsilon^2} \left( \frac{\partial\Phi}{\partial t} \right)^2 \right\rangle^{-1/2} \quad (1.7)$$

onde  $\langle \dots \rangle$  denota a média de todas as partículas que contribuem para o potencial gravitacional coletivo e  $\epsilon$  denota a densidade de energia do sistema. Estimativas a partir da Equação 1.7 mostram que  $t_{\text{rv}}$  é comparável à  $t_{\text{ql}}$ <sup>3</sup>.

O processo de mistura de fases também acontece durante a relaxação violenta, e, considerando conservação de energia, o número de partículas constante e a condição de continuidade da função  $f(\tilde{r}, \tilde{v}, t)$  no espaço do fase, encontra-se o estado de equilíbrio mais provável do sistema. No caso de aglomerados de galáxias, tal estado de equilíbrio mais provável é descrito por uma distribuição de Maxwell-Boltzmann (SEARS; SALINGER, 1979), que é encontrada a partir da análise termodinâmica de um gás perfeito. No entanto, aglomerados podem ser influenciados pela estrutura em grande escala do universo e possuem suas galáxias membro distribuídas de forma não necessariamente esférica. Dessa forma, é importante ter cautela na aplicação desta distribuição, válida para gases perfeitos, a aglomerados de galáxias.

### 1.3 Fatores externos em ação: nature vs nurture

Da mesma forma que até o momento tratamos aglomerados de galáxias como sistemas isolados, o fizemos com suas galáxias membro. No entanto, isso não é exatamente o que é observado. A evolução de uma galáxia tem íntima relação com seu histórico de formação estelar. A dependência da taxa de formação estelar<sup>4</sup> (TFE, “Star Formation Rate”) com a quantidade de gás frio presente no sistema, serve como registro dos diferentes processos que afetam o sistema. Existem diversos processos, tanto internos quanto externos, que alteram diretamente a componente gasosa de uma galáxia, definindo o debate conhecido como “Nature vs. Nurture”.

A Figura 1.1 mostra a distribuição de galáxias no diagrama cor vs massa estelar a partir do estudo de Strateva et al. (2001), onde a bimodalidade é evidente. Nota-se nesta figura dois estágios evolutivos diferentes. A concentração na parte superior da figura define a região conhecida como Sequência Vermelha (SV, “Red Sequence”). Nela, encontram-se galáxias com menor TFE, em sua maioria consideradas Early-

---

<sup>3</sup>Definido como o tempo que o sistema levaria para colapsar sob efeito da sua própria gravidade. A expressão para o tempo de queda livre é dado pela expressão  $t_{\text{ql}} = \left( \frac{3\pi}{32G\bar{\rho}} \right)^{1/2}$ , onde  $\bar{\rho}$  é a densidade média da estrutura considerada

<sup>4</sup>Denota a massa estelar, em  $M_{\odot}$ , formada em um dado intervalo de tempo

Type galaxies<sup>5</sup>. Já a segunda concentração aparece na região inferior da figura, relativa às galáxias azuis no diagrama. Esta região, denominada Nuvem Azul (NA, “Blue Cloud”), inclui galáxias com maior TFE, em sua maioria Late-Type galaxies<sup>6</sup>.

Ao considerarmos todas as galáxias, observamos um contínuo de densidade entre as duas concentrações de galáxias. De forma intuitiva, podemos considerar que aquelas que apresentam uma queda em sua taxa de formação estelar vão gradualmente deixando a NA e deslocando-se em direção à SV. A trajetória de uma galáxia nesta região de transição, conhecida como Vale Verde (VV, “Green Valley”), relaciona-se com os processos que inibem a formação estelar. Estes são chamados de Processos de Truncamento da Formação Estelar (PTFE, “Star Formation Quenching Processes”).

#### 1.4 Processos que interrompem a formação estelar

Muitos dos PTFEs são relacionados a retirar o gás do sistema ou impedir que o mesmo se resfrie (MAN; BELLI, 2018). Um dos principais métodos para truncar a formação estelar é impedir que mais gás seja acregado ao sistema, causando “inanição” (“Starvation”; Trussler et al. (2018)). Outros processos também possuem papel fundamental no truncamento de formação estelar. Processos internos, que aquecem o gás do meio inter-estelar são:

- Núcleos Ativos de Galáxias (NAG, “Active Galactic Nuclei”): o NAG tem uma forte influência em seu entorno. Jatos e ventos possuem momentum o suficiente para aquecer o gás por deposição de energia mecânica e perda de momento angular. Isso mantém o gás numa temperatura alta e evita a formação estelar na galáxia hospedeira;
- Atividade Estelar: Durante a evolução estelar, gás é ejetado da estrela, carregando consigo energia e momentum. Essa energia e momentum aquecem o gás no ambiente, interrompendo a formação estelar

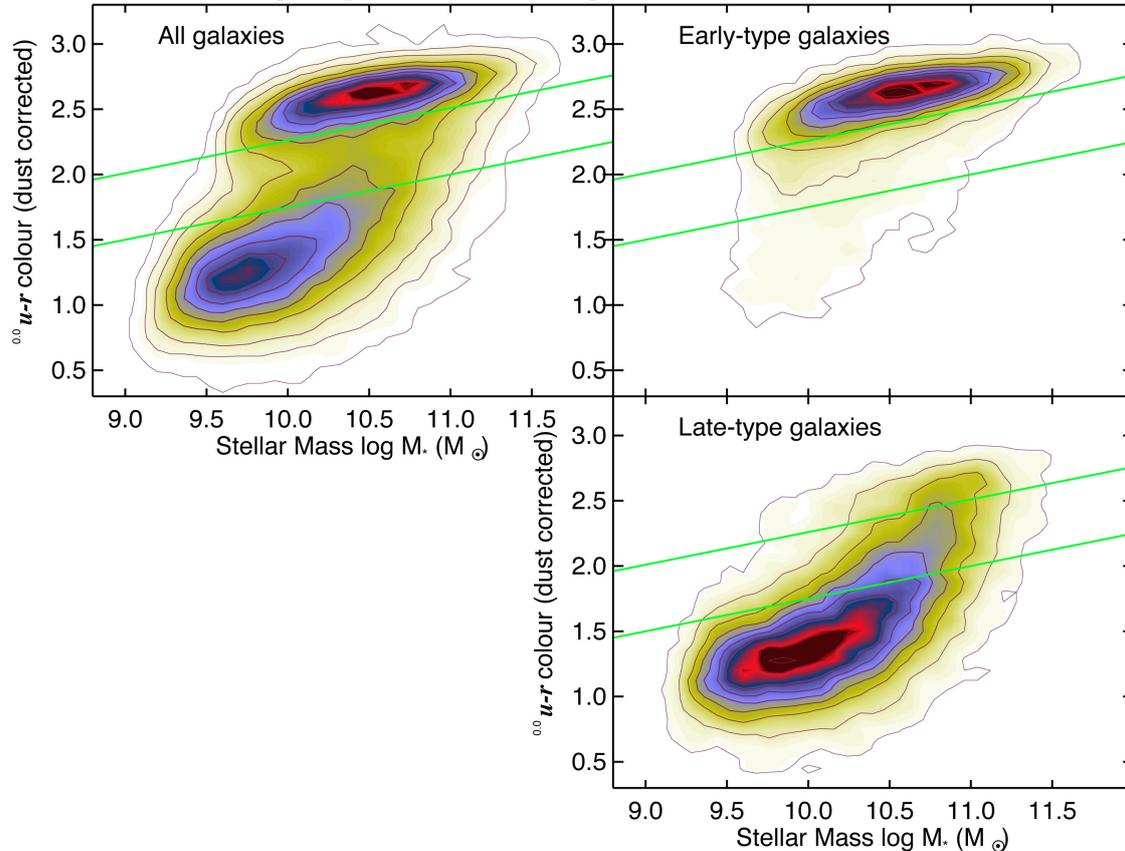
É importante ressaltar que estes processos são mais eficientes para galáxias de  $M_{\text{estelar}} > 10.5M_{\odot}$ . Os processos descritos são intrínsecos da galáxia hospedeira, ou seja, são diretamente dependentes de propriedades internas das galáxias. No entanto, existem outros processos que dependem exclusivamente do ambiente onde a galáxia se encontra. Em um simples exemplo, a fusão de duas galáxias pode causar

---

<sup>5</sup>Galáxias Elípticas e Lenticulares

<sup>6</sup>Galáxias Espirais

Figura 1.1 - Mapa de densidade de galáxias no diagrama cor  $u-r$  x massa estelar. A cor já está corrigida quanto a efeitos da poeira.



Painel superior esquerdo: Galáxias sem separação morfológica. Painel superior direito: considerando somente as “early-type galaxies”. Inferior direito: considerando somente as “late-type galaxies”. A linha verde demarca a região de transição conhecido como VV.

Fonte: SDSS/Galaxy Zoo/Schawinski et al. (2014).

um excesso momentâneo na formação estelar, consumindo todo o gás rapidamente. Caso a galáxia não tenha a reposição dessa componente gasosa, tornar-se-á quiescente.

Outro importante caso de perda de gás (e então inibição da formação estelar) é a retirada por pressão de arraste. Este processo é de fundamental importância, dado o destaque de seus efeitos em aglomerados. Conforme as galáxias membro se movem no aglomerado, o gás quente presente no MIA exerce uma pressão de arraste sobre o gás frio das mesmas. O gás da galáxia, então, deixa de estar ligado gravitacionalmente caso a pressão de arraste supere a força gravitacional exercida no mesmo. Importante lembrar que a velocidade de escape da galáxia diminui em

direção às regiões mais externas, onde então o gás pode ser mais facilmente retirado. A Figura 1.2 mostra a galáxia NGC 4402 que está se movimentando em direção

Figura 1.2 - Galáxia NGC 4402 sob o efeito da pressão de arraste na medida que se move em direção ao centro do aglomerado de Virgo.



Fonte: ESA/Hubble (2004).

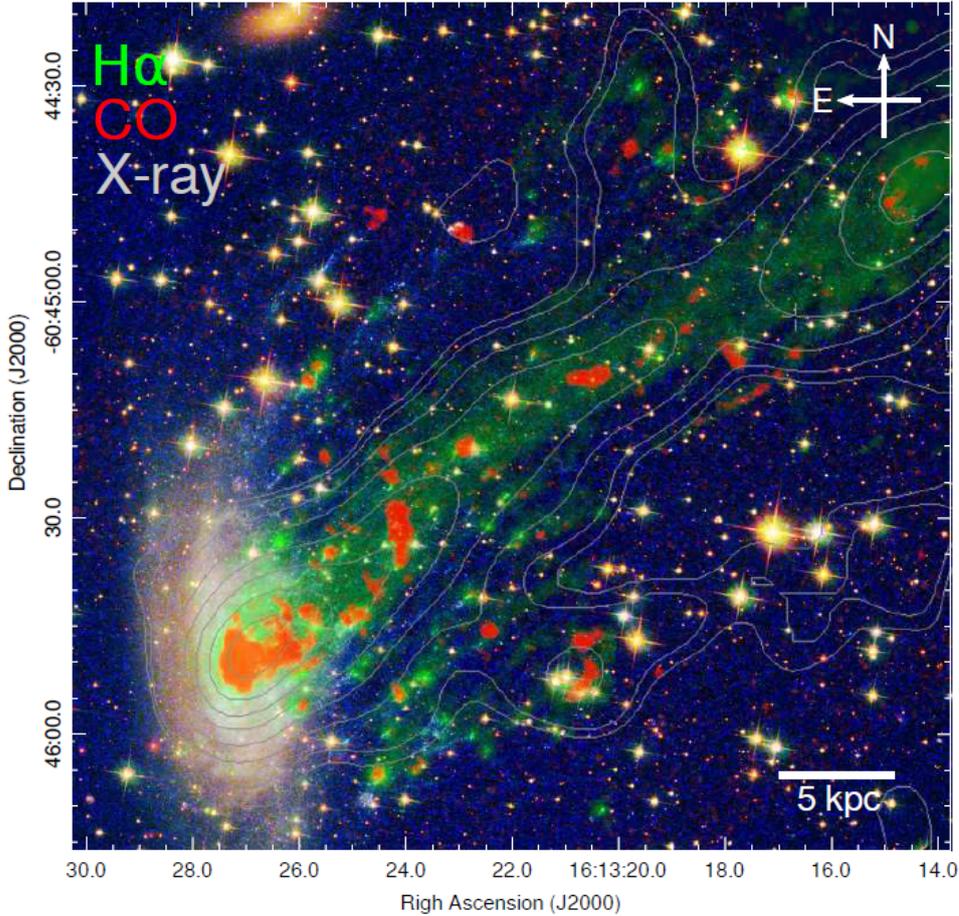
ao centro do aglomerado de Virgo. A maior perda de gás nas regiões externas da galáxia é notada pela geometria curva das regiões periféricas. É importante ressaltar a complexidade do problema aqui tratado. Todos os processos aqui mencionados podem acontecer simultaneamente, definindo a evolução de uma galáxia. Todos são processos responsáveis pela trajetória de uma galáxia da região BC até a RS na Figura 1.1.

### 1.5 Galáxias em aglomerados

Aglomerados de galáxias são excelentes laboratórios para estudos de como as galáxias interagem com o ambiente. Suas regiões centrais possuem alta densidade e dispersão de velocidade, enquanto que nas regiões externas apresentam baixos valores destes parâmetros. Observações recentes mostram em detalhe o que acontece, por exemplo, quando uma galáxia num aglomerado está sob o efeito da pressão de

arraste. Na Figura 1.3, nota-se uma cauda de Hidrogênio ionizado que está sendo retirado do sistema e regiões de formação estelar, em vermelho, mapeado pela emissão de CO. Nesta figura fica evidente o efeito que o ambiente tem sobre a galáxia. Roberts et al. (2019) propõe uma modelagem simples para estudar o efeito da pres-

Figura 1.3 - Imagem da galáxia ESO 137-001 captado pelo experimento HSP WFCP3.



Na imagem é sobreposta a emissão de CO observada pelo experimento ALMA (em vermelho), emissão de H $\alpha$  captada pelo experimento MUSE (em verde) e as curvas de contorno do mapa de raios X proveniente do experimento Chandra. Fonte: Jáchym et al. (2019).

são de arraste. A relação abaixo mostra a condição necessária para que o gás da galáxia seja retirado:

$$\rho_{MIA}(R)v^2 > [g_{ME}(r) + g_{d,*}(r) + g_b(r) + g_{HI}(r) + g_{H2}(r)]\Sigma_{gas}(r); \quad (1.8)$$

onde  $\rho_{\text{MIA}}$  é a densidade do MIA em função da distância ao centro do aglomerado,  $R$ ;  $\Sigma_{\text{gas}}(r)$  é a densidade superficial das duas componentes gasosas (atômico + molecular) em função da distância ao centro da galáxia,  $r$ ;  $g$  é a máxima aceleração gravitacional restauradora para todas as componentes do sistema: Matéria Escura (ME); Disco Estelar (d,  $\star$ ); Bojo (b); gas atômico (HI) e molecular (H2). A Equação 1.8 representa simplesmente o equilíbrio da densidade de energia das componentes. Apesar de possuir uma forma trivial, resolver a inequação não é simples. Para isso, é necessário assumir perfis para a distribuição de matéria de forma a estimar a aceleração de restauração máxima. A velocidade,  $v$ , do lado esquerdo da equação, é estimada como

$$v = \sqrt{3} \times c \times \frac{|z - z_{\text{aglomerado}}|}{1 + z_{\text{aglomerado}}} \quad (1.9)$$

onde  $z$  e  $z_{\text{aglomerado}}$  correspondem ao redshift da galáxia e do aglomerado, respectivamente,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e o fator  $\sqrt{3}$  surge ao assumir um perfil isotrópico para a velocidade. A densidade do MIA é estimada para cada galáxia por meio de perfis de densidade obtidos do levantamento em raio-x Chandra (WEISSKOPF et al., 2002). Para as componentes do lado direito da inequação, assume-se que o bojo e a matéria escura seguem um perfil de Hernquist (HERNQUIST, 1990),

$$\phi_{\text{b,ME}} = -\frac{GM_{\text{b,ME}}}{(r^2 + \zeta^2)^{1/2} + a} \quad (1.10)$$

onde  $\zeta$  denota a direção perpendicular à componente disco e  $a$  é um parâmetro relacionado com o raio efetivo do bojo. Para a componente disco, assume-se um perfil exponencial. Assim, o potencial gravitacional restaurador é, neste caso, dado por

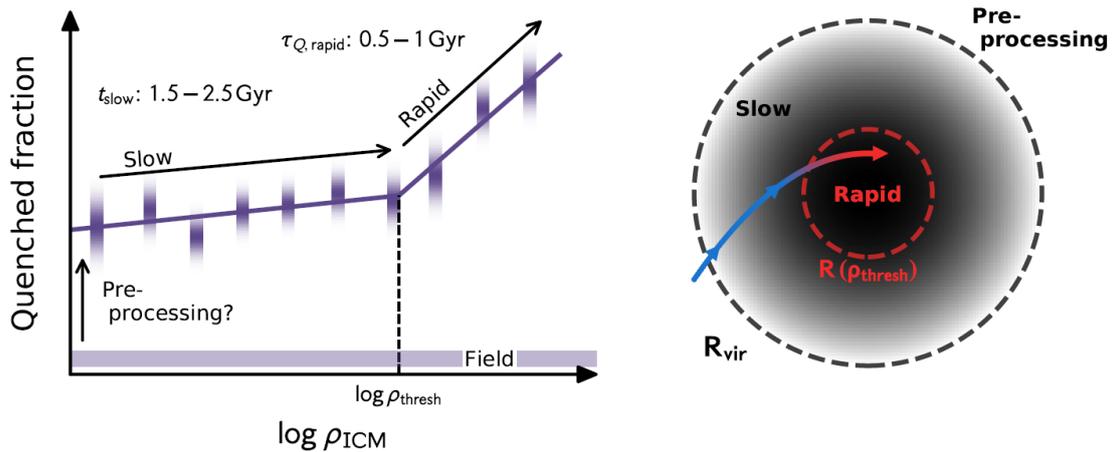
$$g_{\text{d},\star} = 2G\Sigma_{\text{d},\star}(r) = 2G\Sigma_0 e^{-r/R_d} \quad (1.11)$$

onde  $\Sigma_{\text{d},\star}$  é a densidade superficial do disco em função do raio galactocêntrico e  $R_d$  uma escala de comprimento do disco. Para ambas as componentes gasosas, assume-se um perfil exponencial, mas com tamanhos característicos diferentes (BOSELLI et al., 2014). Com esta parametrização é possível estudar o efeito de truncamento na formação estelar considerando um amplo espaço de parâmetros relativos às diferentes componentes.

É importante notar que o efeito de pressão de arraste é mais importante quanto menor for a massa da galáxia, para uma densidade fixa do MIA. Além disso, Roberts et al. (2019) mostram que o efeito só é efetivo acima de um valor mínimo de  $\rho_{\text{MIA}}$ . Isso favorece um modelo de truncamento de formação estelar em duas etapas, no qual acontece o chamado truncamento lento-depois-rápido (WETZEL et al., 2013).

Galáxias nas regiões externas do aglomerado ( $R > R_{\text{limiar}}$ ) podem começar a perda de gás por “inanição”, e, ao atingir a densidade necessária para começar o processo de pressão de arraste, podem perder mais rapidamente seu conteúdo gasoso. Este processo é ilustrado na Figura 1.4. Roberts et al. (2019) estimam que o intervalo

Figura 1.4 - Ilustração de um limiar na densidade do MIA para que aconteça o efeito de pressão de arraste.



Isso sugere um processo dividido em duas etapas: uma rápida e outra lenta (WETZEL et al., 2013). As escalas de tempo de cada fase de truncamento de formação estelar é mostrado no painel da direita.

Fonte: Roberts et al. (2019).

de tempo para que o truncamento de formação estelar de uma galáxia acontece na ordem de  $2 < t_{\text{TFE}} < 3.5$  Ga. No entanto, é importante destacar que esse resultado é consideravelmente menor do que encontrados anteriormente,  $4 < t_{\text{TFE}} < 7$  Ga Mistani et al. (2015). Essa diferença pode ser atribuída às hipóteses utilizadas no trabalho de Roberts et al. (2019), onde é assumido que a galáxia perde todo seu gás após a primeira passagem pericêntrica.

## 1.6 Dinâmica caracterizada pela distribuição de velocidades

A distribuição de Maxwell-Boltzmann pode estar relacionada ao estado de equilíbrio mais provável de aglomerados de galáxias, embora as premissas desta consideração sejam controversas. Esta distribuição é derivada para o caso de um gás ideal em um sistema fechado, onde o número de partículas é constante e as colisões são perfeitamente elásticas. Aglomerados de galáxias possuem diferenças significativas deste cenário idealizado. O número de partículas não é necessariamente constante,

já que pode existir a acreção de novas galáxias no sistema. Mesmo assim, pode-se assumir que sistemas mais próximos do estado de equilíbrio dinâmico possuem uma distribuição de energia próxima da distribuição de Maxell-Boltzmann ((CARVALHO et al., 2017), doravante dC17).

O estado dinâmico de aglomerados de galáxias pode ser descrito por uma distribuição de energia das partículas do sistema e, conseqüentemente, das velocidades. Assim, uma abordagem utilizada para caracterizar a dinâmica de aglomerados é o estudo da distribuição de velocidades de galáxias membro (CARVALHO et al., 2017; RIBEIRO et al., 2013; ROBERTS; PARKER, 2019). Essa técnica foi inicialmente apresentada por Yahil e Vidal (1977), no entanto foi mantida em segundo plano a partir da década de 90, quando a análise dinâmica de aglomerados de galáxias passaram a ter sua dinâmica caracterizada pelo meio da análise de subestruturas (DRESSLER; SHECTMAN, 1988). No início do século XXI, essa técnica passou então a ser reutilizada a partir do trabalho de Hou et al. (2009), que revitaliza o tema conectando gaussianidade aos perfis de dispersão de velocidade.

Uma vez que as velocidades observadas são projeções ao longo da linha de visada, é imperativo que simulações cosmológicas realísticas sejam usadas, permitindo o estabelecimento de uma relação entre o que observamos e a distribuição de velocidades em 3D. Simulações de N-corpos sugerem que o estado de equilíbrio dinâmico é descrito por uma distribuição Gaussiana quando considera-se a velocidade projetada (MERRALL; HENRIKSEN, 2003). Sistemas com acreção de massa não-isotrópica apresentam uma assimetria na distribuição de velocidade, diretamente relacionada com o equilíbrio dinâmico. São encontradas, então, diferenças significativas entre aglomerados classificados de acordo com a distribuição de velocidade, em gaussianos (G) e não-gaussianos (NG), segundo dC17. No entanto, ressaltamos que essa classificação não é absoluta. Aglomerados que possuem uma distribuição de velocidades gaussiana não estão necessariamente em estado de equilíbrio dinâmico. Assim, a não-gaussianidade é interpretada como indício dos processos de acreção de massa dependentes do tempo. Analisando 177 aglomerados do catálogo de Yang (YANG et al., 2007) de acordo com o perfil de velocidade, dC17 encontram as seguintes diferenças entre aglomerados G e NG:

- A mediana da massa do virial para grupos NG é maior que a encontrada nos grupos G por  $\sim 0.22$  dex, em acordo com Roberts e Parker (2019);
- Existe um excesso de galáxias de baixa luminosidade em regiões externas de grupos NG, quando comparados a grupos G;

- Galáxias de baixa luminosidade nas regiões externas de grupos NG apresentam população estelar mais velha e mais enriquecida em metais do que aquelas encontradas em grupos G (pré-processamento);

Desta forma, dC17 concluem que, com base no item 2 acima, a taxa de acreção de galáxias em sistemas NG parece ser significativamente maior do que em sistemas G, em concordância com o resultado de [Cohen et al. \(2017\)](#). Além disso, o item 3 acima reforça o fato de que galáxias recentemente acretadas aos aglomerados NG foram pré-processadas. Este resultado também é corroborado por [Roberts e Parker \(2019\)](#).

Outros trabalhos também apresentam diferenças entre as duas categorias. [Ribeiro et al. \(2013\)](#) encontram uma segregação nas propriedades de galáxias encontradas em regiões externas e internas em aglomerados G, enquanto que em aglomerados NG essa segregação não parece ser significativa.

A limitação à uma única linha de visada cria um porém para este método. Distribuições de velocidade diferentes podem ser encontradas quando consideramos diferentes linhas de visada para um mesmo sistema. É, então, de extrema importância entender os efeitos da limitação à uma única linha de visada, o que só pode ser feito por meio de simulações cosmológicas.

### 1.7 Limitações no método da distribuição de velocidades

Os efeitos de escolher uma dentre várias linhas de visada não pode ser estudado utilizando dados reais. Neste caso, simulações cosmológicas são de grande valia. A simulação MultiDark Planck 2 (MDPL2; ([KLYPIN et al., 2016](#))) é composta por  $3840^3$  partículas de Matéria Escura (i.e. só possui interações gravitacionais) dentro de um cubo de lado  $1000 \text{ Mpc h}^{-1}$ , assumindo um modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM com  $h = 0.6777$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.692885$  e  $\Omega_M = 0.37115$ . As partículas que fazem parte de um mesmo sistema são definidas utilizando o algoritmo de friends-of-friends ROCKSTAR no espaço de fase ([BEHROOZI et al., 2012a](#)). A fusão de estruturas menores em maiores é feita utilizando o algoritmo CONSISTENT TREES ([BEHROOZI et al., 2012b](#)). Esta foi utilizada por [Roberts e Parker \(2019\)](#) para estudar como a limitação a uma única linha de visada afeta a classificação da distribuição de velocidade. Para isto, foram selecionados subhalos que representam grupos e aglomerados em redshift  $z = 0$ .

A distribuição de velocidades é utilizada para classificar o estado dinâmico dos aglomerados. Distribuições de velocidade Não-Gaussianas são consideradas como evidên-

cia de sistemas não relaxados. Assinalar gaussianidade a uma distribuição, contudo, não é algo trivial. Existem diversos métodos que abordam esse tópico, não existindo uma resposta definitiva. Um dos testes mais comuns utilizados para medir o quanto uma distribuição empírica se assemelha a uma hipotética é o teste de Anderson Darling (teste-AD), usado no trabalho de [Roberts e Parker \(2019\)](#) para classificar os aglomerados da simulação de acordo com a gaussianidade da sua distribuição de velocidades projetada ao longo de uma linha de visada (LDV) aleatória ( $G_{ILDV}$  e  $NG_{ILDV}$ ). Um aglomerado é considerado G, caso o teste Teste-AD resulte  $P_{value} < 0.05$ .

Os resultados de [Roberts e Parker \(2019\)](#) mostram que, tanto no caso  $G_{ILDV}$  quanto  $NG_{ILDV}$ , as classificações não são unânimes. A fração de vezes que um aglomerado é considerado Não Gaussiano em 100 linhas de visada diferentes,  $F_{NG}$ , varia crescentemente com a massa, independente do aglomerados ser  $G_{ILDV}$  ou  $NG_{ILDV}$ . Para aglomerados com massa  $M \sim 10^{15}M_{\odot}$ , os  $G_{ILDV}$  são considerados Não Gaussianos em 40% das vezes ( $F_{NG} = 0.4$ ). No caso dos grupos  $NG_{ILDV}$  com a mesma massa,  $F_{NG} = 0.55$ . Para comparação, no caso de grupos com massa  $M < 10^{14}M_{\odot}$ , essa fração é  $\sim 5\%$  para grupos  $G_{ILDV}$  e  $\sim 10\%$  no caso  $NG_{ILDV}$ .

As porcentagens indicam um alto conflito entre as classificações com diferentes linhas de visada. O caso de maior massa apresentado mostra que a limitação à uma única linha de visada pode afetar fortemente os resultados utilizando esse método. A porcentagem de classificações conflitantes com as encontradas quando considerada uma única linha de visada sugere baixa confiabilidade da classificação atribuída. Contudo, quando utilizamos amostras de aglomerados com alta riqueza, o método da distribuição de velocidades de fato separa dois grupos de maneira confiável. Um exemplo disso é a compatibilidade das porcentagens encontradas por trabalhos recentes entre aglomerados G (80%) e NG (e.g. dC17 e [Ribeiro et al. \(2013\)](#)). Essa razão não pode ser explicada por efeitos de projeção, pois em amostras grandes os efeitos de projeção afetam as duas classificações de forma semelhante.

Assim, [Roberts e Parker \(2019\)](#) concluem que o efeito principal de existir uma única linha de visada acessível observacionalmente é atenuar as diferenças entre os aglomerados G e NG. As diferenças entre essas duas classes de aglomerados abordados nos diversos trabalhos aqui citados podem ser interpretados como um limite inferior para a diferença real, reforçando que aglomerados G e NG parecem efetivamente representar sistemas dinâmicos em diferentes estágios de evolução.

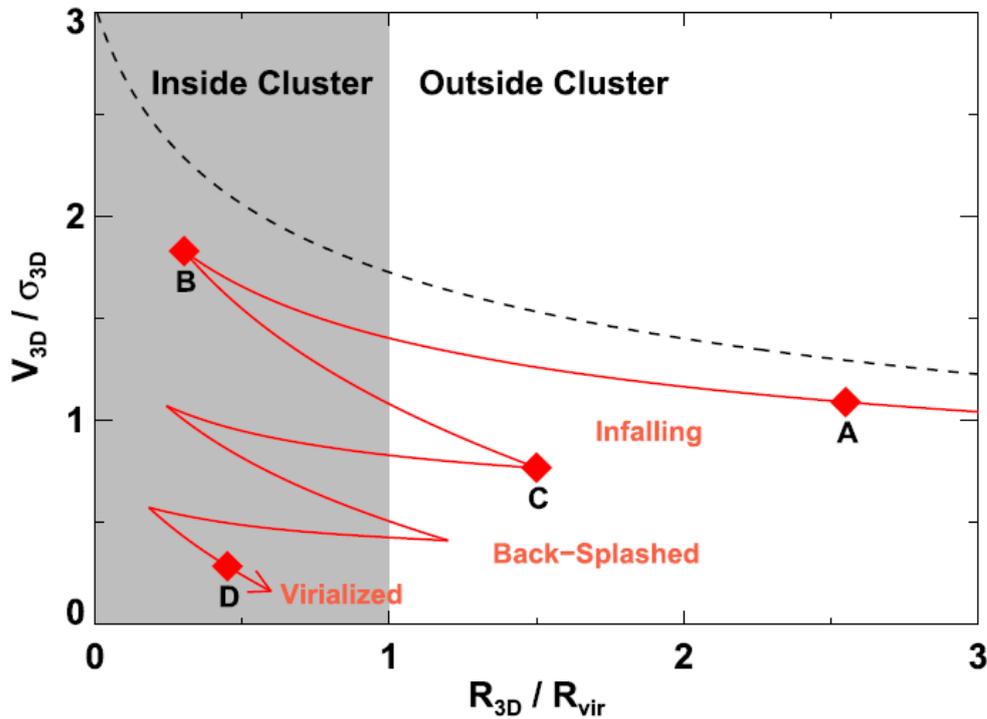
## 1.8 Caracterização de diferentes populações galácticas no espaço de fase projetado

Para um sistema dinâmico qualquer, em geral o espaço de fase é representado como a distribuição de momentum versus posição. No caso de aglomerados de galáxias temos alguns pontos importantes a considerar. Primeiro, como as grandezas observadas são sempre ao longo da linha de visada, então o que temos acesso é um Espaço de Fase Projetado (EFP). Além disso, ao invés do momentum, o EFP é representado pelo diagrama de velocidade peculiar das galáxias (normalizada pela dispersão de velocidade do aglomerado,  $\sigma$ ) versus a distância ao centro do aglomerado (normalizado pelo raio do virial,  $R_{\text{vir}}$ ). Esta representação é clássica no estudo dinâmico de aglomerados. Quando examinamos a distribuição de velocidades das galáxias de um aglomerado estamos marginalizando a distribuição no espaço de fase. Embora mais geral, o EFP traz consigo toda a complexidade da distribuição de galáxias no aglomerado. Podemos dizer que todos os processos que atuam nas galáxias estão ligados com a posição da mesma no EFP. Além disso, a utilização do EFP permite a comparação de populações galácticas ocupando regiões específicas, possibilitando maior especificidade na análise do estágio dinâmico.

Uma galáxia movendo-se em um aglomerado segue uma trajetória específica no espaço de fase. A Figura 1.5 ilustra essa trajetória, onde os eixos radial e de velocidade são normalizados pelo raio do virial ( $R_{\text{vir}}$ ) e dispersão de velocidade ( $\sigma_{3D}$ ), respectivamente. Ao ser acretao ao sistema (ponto A), a galáxia esta na região de “infall”, movendo-se em direção ao centro do aglomerado com velocidade crescente. Depois de sua primeira passagem pericêntrica (ponto B), a galáxia experimenta um ricocheteio e tem seu movimento direcionado para as partes periféricas do aglomerado. Esse processo se repete diversas vezes (ponto C) e, em cada repetição, por processos dissipativos, a órbita da galáxia tem raio menor. Por último, atinge-se a região de virialização (ponto D), onde a galáxia tem órbita e energia bem definidas dentro do sistema. A linha tracejada representa a velocidade de escape, que cria uma fronteira entre galáxias que estão gravitacionalmente ligadas ao aglomerados. A velocidade de escape apresentada é calculada assumindo um perfil de Navarro-Frenk-White (NFW) para a matéria escura (NAVARRO et al., 1996).

Esta trajetória é valida quando todas as 3 componentes de velocidade e posição são acessíveis. A utilização de parâmetros projetados gera degenerescências que impedem o uso dessa trajetória no EFP. Galáxias movimentando-se com uma alta velocidade numa direção perpendicular à linha de visada terão velocidades projetadas desprezíveis.

Figura 1.5 - A trajetória de uma galáxia se movendo na direção do aglomerado, vista na representação do EFP.



A linha pontilhada representa a velocidade de escape. A região sombreada mostra o limite de 1 raio do virial.

Fonte: Rhee et al. (2017)

veis. Desta forma, é de fundamental importância usar simulações cosmológicas para estabelecer regiões no EFP que são dominadas por específicos tipos de órbitas.

### 1.9 O papel das simulações cosmológicas

Como mencionamos anteriormente, o fato do EFP ter grandezas projetadas, causa uma significativa degenerescência. Assim, utilizam-se simulações cosmológicas para mensurar regiões onde a probabilidade de encontrar galáxias de certos tipos de órbitas seja máxima. Por exemplo, pode-se perguntar em que região do EFP a probabilidade de se encontrar uma galáxia em regime de infall, é máxima. Em geral, encontra-se que esta região terá altos valores de raio e de velocidade peculiar (Veja por exemplo a Tabela 2 de Mahajan et al. (2011)). Aqui apresentamos uma breve descrição sobre a simulação utilizada como base para definir duas formas de dividir o EFP em Rhee et al. (2017) e Pasquali et al. (2019). As regiões são apresentadas em detalhe nas Seções 3.1.1 e 3.1.2.

A simulação utilizada como base para a definição das regiões usadas em Rhee et al. (2017) e Pasquali et al. (2019) é denominada YZiCS (HAN et al., 2018). Esta faz parte do conjunto de simulações hidrodinâmicas com resolução expandida. Inicialmente é feita a evolução do sistema de partículas de matéria escura em um cubo de  $200h^{-1}$  Mpc de lado, considerando a cosmologia WMAP7 (GUO et al., 2012). São, então, selecionadas 15 regiões de alta densidade onde é aplicada a resolução expandida e as formulações hidrodinâmicas. Dentre elas: resfriamento do gás; formação estelar; feedback estelar e NAG.

### 1.10 Proposta deste trabalho

Diversos trabalhos encontram significativas diferenças entre os parâmetros de população estelar de galáxias membro de aglomerados G e NG (e.g. (ROBERTS; PARKER, 2019; CARVALHO et al., 2017)). Contudo, a análise de aglomerados específicos apresenta significativa limitação pelo fato de ter somente uma única linha de visada disponível. Sendo assim, todas as comparações entre aglomerados G e NG devem ser feitas considerando uma amostra grande o suficiente, onde o principal efeito de se ter uma única linha de visada é a atenuação da diferença entre os dois grupos. Assim, neste trabalho propomos o estudo sistemático do EFP como forma de melhor compreender as diferenças entre essas duas classes. Para cada região do EFP, são estudados os parâmetros de população estelar das galáxias membro ali contidas. Comparamos estes parâmetros para aglomerados G e NG, considerando dois regimes de luminosidade. Na caracterização do estágio dinâmico do aglomerado utilizamos também a distância entre o centro óptico e o centro em raios X. Comparamos os resultados com os encontrados utilizando a divisão baseada na distribuição de velocidade.



## 2 AMOSTRA, DADOS E MÉTODOS

Neste trabalho utilizamos os sistemas previamente definidos em [Yang et al. \(2007\)](#) para investigar a relação entre o estado dinâmico de aglomerados e os parâmetros de população estelar das galáxias membro. Os aglomerados foram redefinidos a partir de observações do levantamento SDSS-DR7 com o uso de uma técnica de “Shiftgapper”, a qual faz uso somente da ascensão reta, declinação e redshift médio oriundos do catálogo de Yang. Usamos as estimativas dos parâmetros de população estelar feitas por [Carvalho et al. \(2017\)](#), obtidas por meio de um ajuste espectral feito com o código STARLIGHT ([FERNANDES et al., 2005](#)).

A classificação da gaussianidade da distribuição de velocidades das galáxias membro é de extrema relevância para este trabalho. Aqui apresentamos duas abordagens diferentes para esta identificação: uma combinação linear de gaussianas (MClust); e a medida da distância entre duas distribuições (Distância de Hellinger). A última abordagem apresentou melhor performance, como será discutido. Além disso, limitando nossa análise a sistemas com massa  $M \geq 10^{14}M_{\odot}$  e confiabilidade de pelo menos 70% na classificação de gaussianidade, definimos uma amostra principal de 177 aglomerados. Confirmando resultados anteriores ([RIBEIRO et al., 2013](#)), encontramos que  $\sim 80\%$  são classificados como gaussianos e  $\sim 20\%$  como não-gaussianos. Definimos ainda uma subamostra do conjunto principal, composto por 62 aglomerados com observação e centro definidos em raios X.

### 2.1 Catálogo de Yang

Com base nos dados do SDSS-DR5, [Blanton et al. \(2005\)](#) organiza um catálogo para o estudo de propriedades e evolução de galáxias, denominado New York University Value-Added Galaxy Catalogue (NYU-VAGC). [Yang et al. \(2007\)](#) aplica o algoritmo desenvolvido por [Yang et al. \(2005\)](#) no NYU-VAGC para definir grupos e aglomerados. Resumidamente, o algoritmo avalia a luminosidade coletivamente e, utilizando um modelo de ocupação do halo de matéria escura, define quais galáxias pertencem a um dado grupo. Quando comparado ao método “Friends of Friends” usualmente para associar galáxias a um único halo de matéria escura, o método apresentado por [Yang et al. \(2005\)](#) mostrou-se mais eficiente.

A amostra utilizada por [Yang et al. \(2007\)](#) é composta por 362356 galáxias com redshift no intervalo  $0.01 < z < 0.20$  e completeza  $C > 0.7$  (para mais detalhes vide Seção 2 de [Yang et al. \(2007\)](#)). Aplicando o algoritmo de identificação de grupos eles encontram 301237 grupos e uma considerável quantidade de halos contendo somente

uma galáxia ( $\sim 88\%$ ).

## 2.2 Dados em raios X

Enquanto galáxias são observadas no espectro óptico, a faixa de raios X é utilizada para caracterizar o gás intra-aglomerado. Brevemente, o freamento de elétrons por núcleos atômicos gera radiação eletromagnética (“Bremsstrahlung”). Os fótons produzidos possuem energias características da ordem de 10-100 keV. Seleccionamos aqui 3 fontes de dados em raios X: a) o catálogo Meta-Catalogue of X-ray detected Clusters of galaxies ((PIFFARETTI et al., 2011), MCXC), que tem como base o levantamento ROSAT X-Ray All Sky Survey ((TRÜMPER, 1982), ROSAT); b) o trabalho de Lovisari e Reiprich (2018), que utiliza dados do experimento X-ray Multi-Mirror Mission ((JANSEN et al., 2001), XMM-NEWTON); e c) o estudo feito por Andrade-Santos et al. (2018), que utiliza dados do observatório Chandra X-Ray Observatory ((WEISSKOPF et al., 2000), Chandra).

O catálogo MCXC reúne observações de uma subamostra de aglomerados de galáxias do experimento ROSAT. Dentre os trabalhos considerados estão NORthern ROSAT All-Sky ((BÖHRINGER et al., 2000), NORAS), ROSAT-ESO Flux-limited X-ray ((BÖHRINGER et al., 2004), REFLEX), BCS, eBCS, SGP, NEP, MACS, and CIZA e de aglomerados detectados acidentalmente (160SD, 400SD, SHARC, WARPS e EMSS). O catálogo contém 1743 aglomerados com diversos parâmetros listados, como Ascensão Reta (AR) e Declinação (DEC) do centro, redshift, luminosidade em raios X, massa e raio do virial.

Por sua vez, Lovisari e Reiprich (2018) utilizam observações de alta qualidade do experimento XMM-Newton para caracterizar a distribuição de metalicidade em função da distância ao centro do sistema. Eles catalogam propriedades de 207 aglomerados próximos ( $z \leq 0.1$ ) nos mais diversos estágios dinâmicos.

O catálogo construído por Andrade-Santos et al. (2018), a terceira fonte de dados em raios X utilizada neste trabalho, contém 100 aglomerados detectados por efeito Sunyaev-Zeldovich pelo experimento Chandra, com redshift  $z \leq 0.3$ . Destes, 49 estão presentes nas observações do experimento Planck Early Sunyaev-Zeldovich (ESZ)<sup>1</sup> (TAUBER et al., 2004) e outros 47 estão disponíveis no catálogo HIGhest X-ray FLUX Galaxy Cluster Sample, HIFLUGCS<sup>2</sup> (REIPRICH; BOEHRINGER, 2002).

---

<sup>1</sup>uma lista de objetos candidatos a aglomerados de galáxias via efeito Sunyaev-Zeldovich catalogado pela missão PLANCK.

<sup>2</sup>composto pelos 64 aglomerados de galáxias mais brilhantes presentes no céu, de acordo com o experimento ROSAT.

### 2.3 Uso e redefinição do catálogo de Yang

Utilizando dados do SDSS-DR7 (ABAZAJIAN et al., 2009), dC17 redefine uma versão atualizada do catálogo de Yang. A redefinição restringe-se a galáxias no intervalo de redshift  $0.03 \leq z \leq 0.1$  e magnitude na banda-r de 17.78, que corresponde ao limite de completeza espectroscópica do levantamento. Com essa imposição em fluxo, garante-se uma amostragem da função de luminosidade dos aglomerados até  $M^* + 1$ . Já o limite inferior em redshift é imposto com o intuito de evitar um viés nos parâmetros de população estelar devido a abertura fixa de 3 segundos de arco utilizada no levantamento SDSS-DR7 .

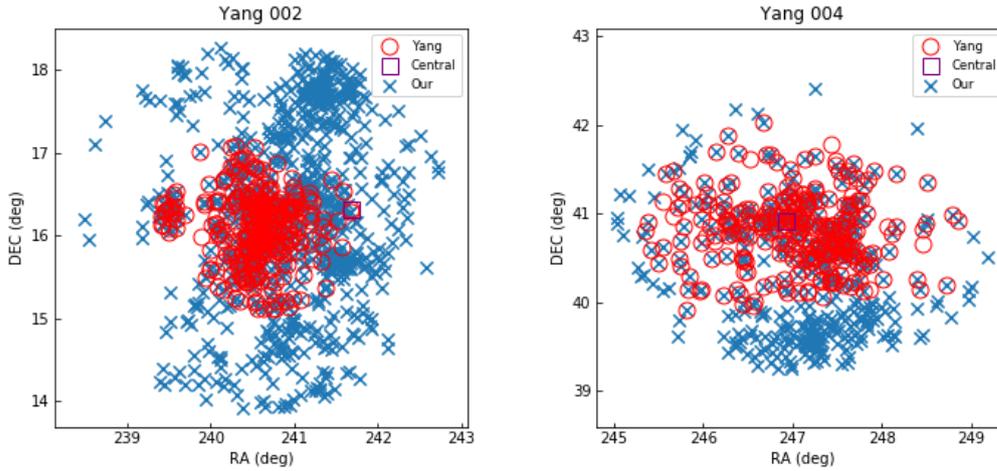
Para cada aglomerado a definição de galáxias membro é feita com o uso de uma técnica denominada “Shiftgapper” (LOPES et al., 2008). Galáxias até uma distância máxima de  $2.5h^{-1}$  Mpc (3.47 Mpc para  $h=0.72$ ) do centro e dentro de  $\pm 4000$  km/s da velocidade média do aglomerado são selecionadas do SDSS-DR7 e utilizadas como dado inicial. Para cada aglomerado, as galáxias selecionadas são listadas por ordem de distância ao centro do aglomerado e intervalos radiais são definidos de tal forma a conterem no mínimo 15 galáxias. Este critério resulta em um valor de intervalo radial mínimo de  $0.42h^{-1}$  Mpc. Em cada partição a separação entre galáxias membro e espúrias é feita por meio da estimativa da descontinuidade na distribuição de velocidades (“gap” na distribuição). Assim, as galáxias consideradas membro compõe um novo sistema e, a partir delas, calcula-se o centro como a mediana das coordenadas. Esta técnica é reiterada até que não existam mais galáxias espúrias no sistema. Com as galáxias membro definidas, determina-se o raio no qual a densidade é 200 vezes a densidade média do campo geral onde não observamos aglomerados,  $R_{200}$ , a massa total dentro de  $R_{200}$ ,  $M_{200}$ , e a dispersão de velocidade,  $\sigma$ , para o aglomerado (vide Lopes et al. (2008) para mais detalhes). Uma importante característica deste método é o fato de que ele não faz nenhuma hipótese a priori sobre o estado dinâmico do aglomerado. Por fim, somente sistemas com pelo menos 20 galáxias membro dentro de  $R_{200}$  são considerados, resultando numa amostra de 319 aglomerados.

As definições de dC17 e Yang et al. (2007) apresentam diferenças significativas entre as galáxias membro de cada aglomerado. A Figura 2.1 apresenta uma comparação entre as duas definições para os aglomerados Yang 002 e Yang 004. Nela fica evidente a diferença entre o número de galáxias membro, principalmente nas regiões externas ( $R > R_{200}$ ). A comparação entre as seleções para mais aglomerados é apresentada no Apêndice A. Neste trabalho utilizamos a seleção de galáxias membro feita por

dC17.

Nesse estudo dividimos a amostra de galáxias em dois domínios de luminosidade distintos, baixo fluxo (BF) e alto fluxo (AF), da mesma forma que dC17. O primeiro compreende galáxias com  $M_r \leq -20.55$ , que garante uma amostragem da função de luminosidade até  $M^* + 1$ . O regime BF, por sua vez, contém galáxias com magnitudes no intervalo  $-20.55 < M_r \leq -18.40$ . O limite superior neste caso corresponde a completude espectroscópica em  $z=0.04$  e, apesar de ser aplicável apenas para galáxias membro de aglomerados com redshift  $z \leq 0.04$ , garante uma amostragem da função de luminosidade até  $M^* + 3$ .

Figura 2.1 - Comparativo das galáxias definidas nos catálogos de Yang (círculos vermelhos) e de Carvalho (x azul). São mostrados os casos do aglomerados Yang 002 (esquerda) e Yang 004 (direita). Destacamos também para cada aglomerado a galáxia mais massiva (“central”) de acordo com Yang et al. (2007).



## 2.4 Estimativa dos parâmetros de população estelar

Os parâmetros que caracterizam a população estelar de cada galáxia são calculados através de um ajuste espectral usando o código “STARLIGHT” (FERNANDES et al., 2005). Limitamos a estimativa dos parâmetros à galáxias sem anomalias no espectro da mesma. De forma resumida, o método considera que o espectro de uma galáxia pode ser descrito por meio de uma combinação linear de espectros base representando estrelas com idade e metalicidade específicas, denominados População Estelar Singular (PES - “Single Stellar Population”). Dessa forma, o programa “STAR-

LIGHT” utiliza um acervo de PESs que serão usadas como base para a combinação linear mencionada. Neste caso, utilizamos um acervo PES denominado “Medium resolution INT Library of Empirical Spectra” ((SANCHEZ-BLAZQUEZ et al., 2006), MILES). Durante o processo o espectro da galáxia é transformado para o referencial de repouso e a correção de extinção é aplicada (BARBERA et al., 2009). Parâmetros como idade, metalicidade e massa estelar são então estimados a partir da combinação linear que melhor representa o espectro.

Dada a importância dos parâmetros de população estelar nesse estudo, particular atenção foi dedicada à estimativa de incertezas, calculadas de duas formas independentes. Os parâmetros estimados foram comparados com os valores disponibilizados no SDSS-DR12. Nesse caso, os resíduos entre as duas estimativas são:  $\Delta\text{Idade} = 3.46 \pm 2.74$  Giga anos;  $\Delta[Z/H] = -0.006 \pm 0.082$ ; e  $\Delta M_{\text{estelar}} = 0.10 \pm 0.081$  dex. Verificamos que tanto a metalicidade quanto a massa estelar apresentam uma concordância razoável. No entanto, a diferença em idade é significativa, o que pode estar associada à utilização de uma biblioteca espectral diferente ((BRUZUAL; CHARLOT, 2003), BC03). Independentemente, uma segunda comparação foi feita com base em observações repetidas de uma mesma galáxia. Selecionamos 2543 galáxias do SDSS-DR7 com mais de uma observação. Importante ressaltar que neste trabalho selecionamos somente galáxias com magnitude até o limite de 17.78 na banda r, com  $0.03 \leq z \leq 0.1$  e cujo espectro tenha uma razão  $S/N > 20$ . Neste caso, os resíduos dos parâmetros são  $\Delta\text{Idade} = -0.01 \pm 1.19$  Ga;  $\Delta[Z/H] = 0.0038 \pm 0.0439$ ; e  $\Delta M_{\text{estelar}} = -0.001 \pm 0.0746$  dex. Nota-se que, no caso dessa segunda comparação, os parâmetros apresentam ótima consistência.

## 2.5 Classificação do estágio dinâmico do aglomerado

Embora o estudo do estado dinâmico de aglomerados de galáxias tenha evoluído enormemente nas últimas décadas, o tema ainda é controverso (KRAVTSOV; BORGANI, 2012). A relação entre o estágio dinâmico e a gaussianidade da distribuição de velocidades tem sido o motivo de várias investigações (RIBEIRO et al., 2013; ROBERTS; PARKER, 2019; CARVALHO et al., 2017). Neste trabalho a gaussianidade não é entendida no sentido termodinâmico, mas como uma identificação de duas famílias que podem denotar estágios dinâmicos distintos. Como discutido no capítulo 1, a aplicação da distribuição de Maxwell-Boltzmann como referência não é justificada teoricamente. Como será apresentada no Capítulo 4, uma das propostas de continuidade deste projeto é o estudo sistemático de distribuições de velocidade de grupos e aglomerados nas simulações “ILLUSTRIS” (VOGELSBERGER et al., 2014).

Assim, entendemos gaussianidade como uma definição funcional discriminando duas famílias de aglomerados de galáxias que, como mostrado por [Carvalho et al. \(2017\)](#), são constituídos de galáxias com propriedades distintas.

Comparar a similaridade de duas distribuições é um velho problema em estatística. Diversos testes podem ser utilizados para este propósito, como o teste de Anderson-Darling ([ANDERSON; DARLING, 1952](#)) e o teste de Komolgorov-Smirnov ([LILLIEFORS, 1967](#)), mas todos apresentam limitações em sua performance. Ao abordar um caso extremamente específico, [Helguero \(1904\)](#) mostra que duas distribuições gaussianas com médias  $\mu_1$  e  $\mu_2$  e mesmo desvio padrão,  $\sigma$ , serão vistas como uma única gaussiana se, e somente se,  $|\mu_1 - \mu_2| < 2\sigma$ .

A definição de gaussianidade pode ser feita a partir de duas abordagens diferentes. A primeira consiste na caracterização do número de componentes em uma dada distribuição. Casos nos quais mais de uma componente é identificada podem ser associados à distribuições consideradas não-gaussianas. Já a segunda estratégia consiste em avaliar diretamente o desvio da distribuição observada de uma distribuição gaussiana. Essas abordagens foram apresentadas em detalhe em dC17. A seguir apresentamos, de forma resumida, os conceitos fundamentais destas duas estratégias de descrição de uma dada distribuição.

### 2.5.1 MClust

Aqui apresentamos a abordagem na qual a distribuição de velocidades observada é entendida como a combinação linear de várias distribuições gaussianas. “MClust”, escrito em linguagem-R ([FRALEY; RAFTERY, 1998](#)), “mclust”), é um programa utilizado para modelar distribuições como uma mistura finita de distribuições gaussianas. Uma hipótese amplamente usada nestes estudos é a de que todos os modos possuem a mesma distribuição geradora, mas com diferentes parâmetros característicos. No caso aqui considerado, utiliza-se a hipótese de que todas as componentes que definem a distribuição de velocidades são descritas por distribuições gaussianas. A escolha de dC17 pelo programa “MClust” foi baseada em estudos que o colocam como o mais eficiente para estudar bimodalidade em amostras de tamanho  $N \geq 20$  ([RIBEIRO et al., 2013](#)). dC17 apresenta um estudo detalhado sobre a mistura de modos gaussianos, onde uma dada distribuição,  $p(x)$ , pode ser interpretada como uma combinação linear destes modos. Assim, podemos escrever:

$$p(x_i|\theta) = \sum_{i=1}^{N_{\max}} \pi_i G(x_i|\mu_i, \sigma_i) \quad (2.1)$$

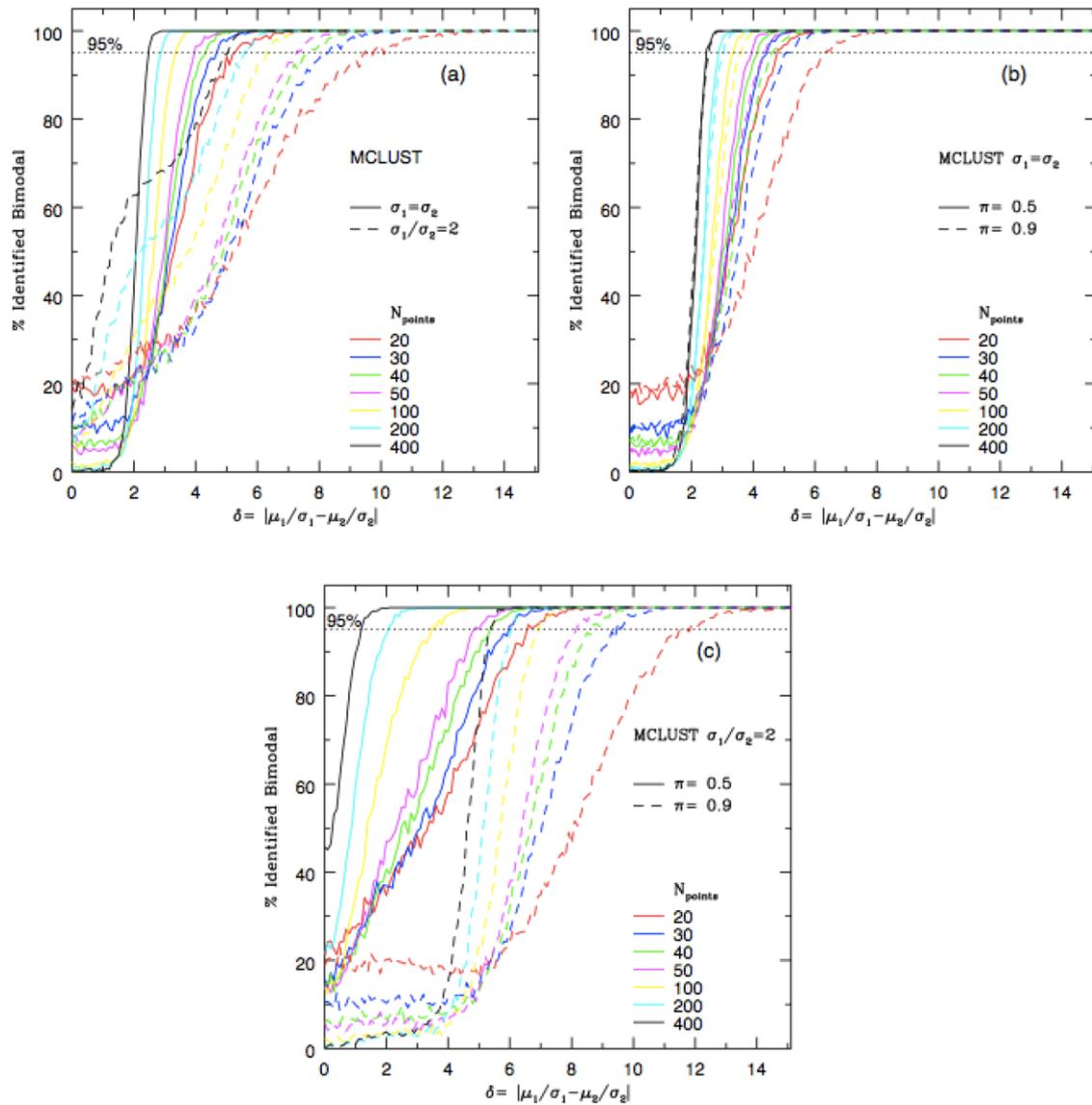
onde  $\pi_i, \mu_i, \sigma_i$  são, respectivamente, o peso, a média e o desvio padrão da  $i$ -ésima componente gaussiana.  $N_{\max}$  é o número máximo de componentes, cuja otimização é feita utilizando o Critério de Inferência Bayesiana (CIB, “Bayesian Inference Criteria”). Definido  $N_{\max}$ , MClust estima  $\pi_i, \mu_i, \sigma_i$  para cada uma das componentes. dC17 faz uma caracterização pormenorizada da determinação da bimodalidade de uma distribuição e mostram como a distância entre os dois modos,  $\delta = |\mu_1/\sigma_1 - \mu_2/\sigma_2|$ , depende dos parâmetros que os caracterizam. Distribuições bimodais são então caracterizadas pelo número total de pontos,  $N_{\text{tot}}$ , pela razão entre os desvios padrão,  $\sigma_1/\sigma_2$ , e pela distância entre os modos,  $\delta$ . dC17 gera 200 realizações para cada valor de  $\pi$  no intervalo  $0.5 \leq \pi \leq 0.9$ , em intervalos de 0.1, totalizando assim 1000 realizações. O resultado, apresentado na Figura 2.2(a), mostra que, independentemente do número de pontos, a eficiência em separar os dois modos é maior quando os desvios padrão são iguais. Além disso, dC17 ressalta que existe uma considerável queda de performance para  $\delta < 2$ . Para estudar o impacto do parâmetro  $\pi$  na separação dos modos, os dois valores limites do intervalo, 0.5 e 0.9, são examinados de forma análoga à anterior. Novamente, é notado uma maior efetividade em detectar bimodalidade em função de  $\delta$  no caso em que  $\sigma_1 = \sigma_2$ , como mostrado nas Figuras 2.2(b) e 2.2(c). Mais uma vez dC17 encontra uma abrupta queda na identificação de bimodalidade na região  $\delta < 2$ , independente do número de pontos.

De forma geral, o MClust depende de todos os parâmetros envolvidos na mistura e tem uma clara limitação para  $\delta < 2$ . Esse é um importante fato a ser levado em conta quando comparado ao método Distância de Hellinger (DH, “Hellinger Distance”), apresentado a seguir.

### 2.5.2 Distância de Hellinger

A segunda abordagem empregada por dC17 para definir gaussianidade da distribuição de velocidades baseia-se na DH. Esta é fundamentada na definição do coeficiente de Bhattacharyya (BHATTACHARYYA, 1943). Considere um espaço de medidas dado por  $[\Omega, \mathcal{B}, \nu]$  e  $\mathcal{P}$  o conjunto de todas as probabilidades das medidas em  $\mathcal{B}$ , que neste caso é assumida contínua em relação à uma variável aleatória  $\nu$ . Lembrando que uma medida de probabilidade é uma função real definida sobre um conjunto de eventos em um espaço de probabilidades que satisfaz as propriedades de medida. Para duas medidas de probabilidades  $P_1$  e  $P_2$  que pertencem ao conjunto  $\mathcal{P}$ , o coeficiente de Bhattacharyya entre elas mede o quanto as duas distribuições de probabilidade são

Figura 2.2 - Performance do programa MClust em identificar bimodalidade em um conjunto de dados gerados com diversos parâmetros sendo variados: número de pontos, proporção entre os modos (de 0.5 a 0.9 em passos de 0.1) e relação entre os desvios padrão.



É mostrada a porcentagem de bimodalidade recuperada versus a distância entre as duas gaussianas,  $\delta$ . A linha pontilhada demarca uma eficiência de 95%. As cores representam diferentes números de pontos na amostra simulada e linhas sólidas ou tracejadas indicam diferentes condições para  $\sigma$  e  $\pi$ , como explicitada em cada painel. Fonte: Carvalho et al. (2017).

próximas, e é definido como:

$$p(P_1, P_2) = \int_{\Omega} \sqrt{\frac{dP_1}{d\nu} \cdot \frac{dP_2}{d\nu}} d\nu \quad (2.2)$$

A DH surge de uma adaptação do coeficiente de Bhattacharyya para distribuições discretas. Utilizada pela primeira vez em astronomia por [Ribeiro et al. \(2013\)](#), este é definido como:

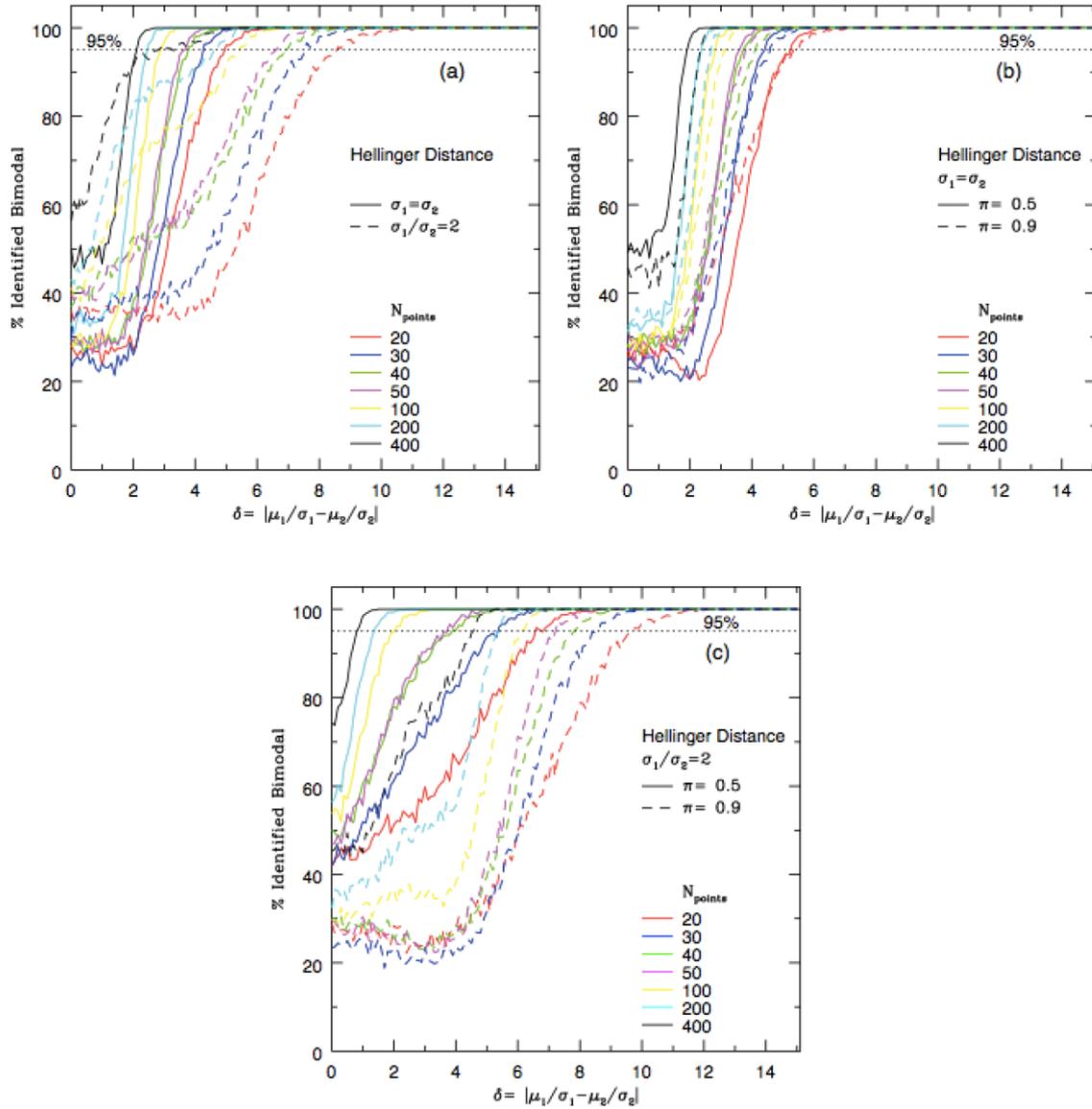
$$HD^2(p, q) = 2 \sum_x [\sqrt{p(x)} - \sqrt{q(x)}]^2 \quad (2.3)$$

Por construção, os valores de DH variam entre  $0 \leq DH \leq \sqrt{2}$ , contudo é um procedimento usual normalizar este parâmetro.

Para o cálculo de DH, dC17 utiliza o pacote “distrEX” ([KOHL et al., 2019](#)), disponível na linguagem R. No processo, os dados observados são suavizados utilizando um “kernel” de tamanho  $\sigma_r/2$ , a metade do desvio padrão da distribuição, estimado através dos quartis da distribuição observada. O fator 2 foi determinado empiricamente. Os mesmos testes realizados para a caracterização do método MClust foram também feitos para HD, com as mesmas realizações. O resultado de dC17 é mostrado na [Figura 2.3](#). A eficiência de DH também diminui consideravelmente para  $\delta < 2$ , mas ainda assim apresenta um maior percentual de identificação de bimodalidade para esta região quando comparado ao “MClust”. Sendo assim, quando comparados os dois métodos, ambos têm performance semelhante nos casos limites com relação ao peso ( $\pi = 0.5$  e  $0.9$ ). Apesar disso, fora dos casos limites, o método da Distância de Hellinger prova-se mais eficiente em detectar bimodalidade, sendo então escolhido por dC17 como o método a ser usado para classificar as distribuições de velocidade entre gaussianas e não-gaussianas.

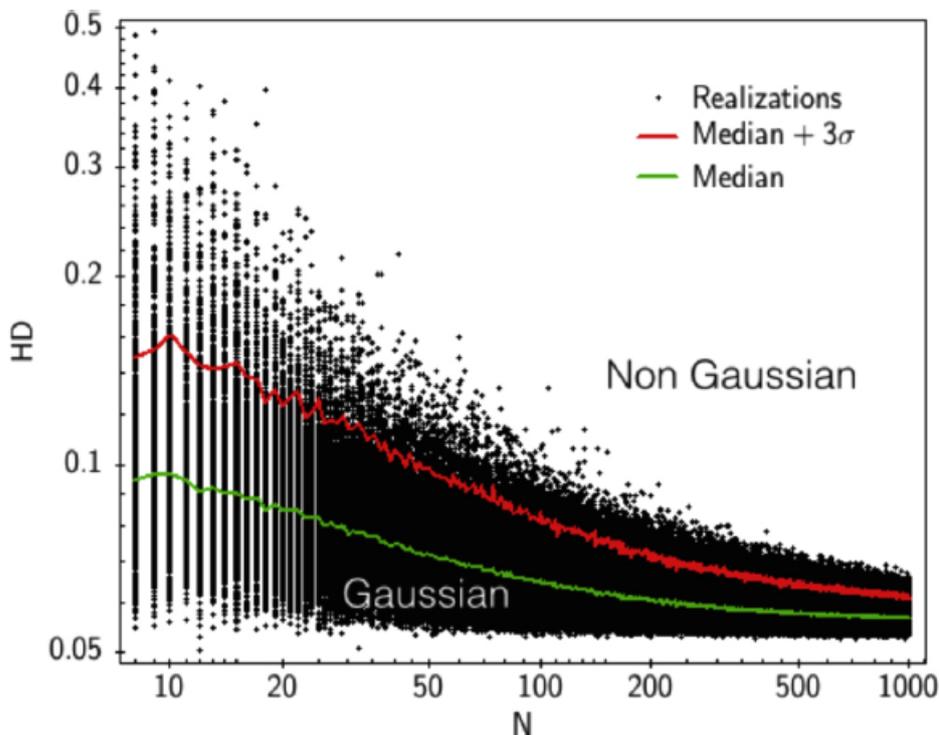
A DH não tem valores absolutos de distância, é sempre um valor relativo e, por isso, requer uma calibração por intermédio de distribuições previamente conhecidas. Neste sentido, a calibração é feita gerando 1000 realizações de uma distribuição de  $N$  pontos, com  $N$  variando de 5 a 1000. Todas as realizações são normalizadas para  $\mu = 0$  e  $\sigma = 1$ . O critério de classificação é, então, definido como: se o valor de DH encontrado estiver acima da mediana +  $3\sigma$  (onde  $\sigma$  neste caso mede a dispersão das medidas de DH para um dado número de pontos,  $N$ ), o sistema é considerado NG, caso contrário é classificado como G. A [Figura 2.4](#) mostra o resultado da calibração, onde a linha verde denota o comportamento da mediana dos valores de DH e a linha vermelha a quantidade mediana +  $3\sigma$ , para cada valor de  $N$ . Esta linha é utilizada para separar os regimes G e NG. dC17 conclui, portanto, que o método

Figura 2.3 - Semelhante à figura 2.2, mas para o método da Distância de Hellinger.



Fonte: Carvalho et al. (2017).

Figura 2.4 - Calibração da DH com relação ao número de pontos presente na distribuição analisada.



A curva verde representa a mediana de HD para um dado valor de N, enquanto a vermelha representa a mediana+3σ correspondente ao limiar separando sistemas considerados G e NG.

Fonte: Carvalho et al. (2017).

DH tem performance ligeiramente superior àquela obtida utilizando “MClust”. Além disso, trata-se de um método independente da hipótese sobre a forma dos modos compondo a distribuição de velocidade. Assim, daqui por diante a categorização G e NG refere-se à classificação feita com DH.

Considerando a natureza estatística da medida, ressaltamos que cada classificação tem associada a si uma probabilidade, medida por meio da técnica de “bootstrap”. Define-se, então, uma confiabilidade mínima de 70% na classificação de DH, que reduz o número de aglomerados de 319 para 214. Ademais, a utilização de aglomerados com pelo menos 20 galáxias, que equivale a uma massa de  $10^{14}M_{\odot}$  (dC17), implica em um novo decréscimo na amostra, restando assim 177 sistemas. Destes, 143 aglomerados são classificados como G e 34 classificados como NG. Das 10144 galáxias contidas nestes 177 aglomerados, 7156 estão no regime AF, enquanto o regime BF conta com 2988 galáxias. Reiteramos que até aqui apresentamos uma descrição dos dados apresentados em dC17, os quais servem de base para este trabalho (dados

disponíveis sob requerimento).

## 2.6 Definição do centro do aglomerado

Para a análise dinâmica aqui proposta, é fundamental uma estimativa robusta do centro do sistema, que corresponda ao mínimo do poço de potencial gravitacional. Embasada no fenômeno de segregação de massa<sup>3</sup>, uma aproximação adotada aqui e vastamente utilizada na literatura é a média das coordenadas (AR e DEC), ponderadas pelo fluxo luminoso.

Conceitualmente, o centro calculado a partir das galáxias membro pode não representar a posição de equilíbrio do poço de potencial, uma vez que as galáxias representam uma fração muito pequena da massa total do aglomerado. Lembremos que  $\sim 85\%$  está na forma de matéria escura e  $\sim 10\%$  na forma de gás quente. Logo, galáxias contribuem de forma irrelevante para a massa do sistema. Por depender somente da massa contida na forma de galáxias, o centro óptico pode sofrer variações que não correspondem à variação nas componentes dominantes da massa do aglomerado. Isso é de extrema importância para o estudo aqui apresentado. Aglomerados com duas subestruturas, por exemplo, podem ter seu centro óptico deslocado para a média das posições das duas componentes. Isso, no entanto, não necessariamente corresponde ao centro gravitacional do sistema.

Portanto, espera-se que o centro do aglomerado calculado a partir da emissão do gás quente deve, a princípio, refletir melhor o poço de potencial do sistema. Este trabalho diferencia-se por utilizar também o centro definido em raios X ( $c_{\text{raiosx}}$ ). Contudo, esse parâmetro não é disponível para o 177 aglomerados. Utilizando um raio de 5 minutos de arco centrado no  $c_{\text{opt}}$  como critério de busca nos catálogos apresentados na Seção 2.2, encontramos uma estimativa de  $c_{\text{raiosx}}$  para 62 dos 177 aglomerados.

## 2.7 Caracterização da amostra de 62 aglomerados

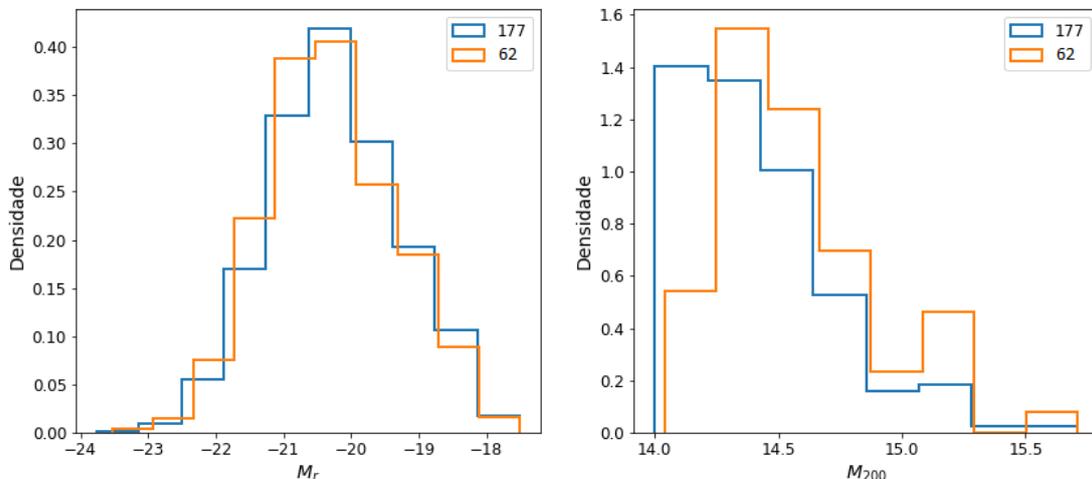
Para evitar um viés nas análises que aqui serão apresentadas, é importante testar a equivalência estatística entre as duas amostras. A Figura 2.5 mostra as distribuições de magnitude absoluta ( $M_r$ ) e massa do virial ( $M_{200}$ ) para as duas amostras. Apesar de visivelmente semelhantes, a aplicação de um teste de permutação resulta em um p-value de 0.13 para distribuição de magnitude e 0.01 para massa. Adotando o limite

---

<sup>3</sup>Em aglomerados, galáxias mais brilhantes (mais massivas) encontram-se preferencialmente nas regiões centrais.

de significância como  $\alpha = 0.05$ , temos que no que diz respeito a  $M_r$  as amostras são estatisticamente equivalentes, ou seja, estamos cobrindo a mesma distribuição de luminosidade das galáxias membro. No entanto, em relação a  $M_{200}$  a comparação das distribuições de massa evidencia um excesso para aglomerados mais massivos para o conjunto de 62 aglomerados. Enquanto a amostra de 177 aglomerados contém 10144 galáxias, a amostra com 62 aglomerados é constituída por 4679 sistemas galácticos. Notamos que para a amostra de 62 aglomerados com centros baseados

Figura 2.5 - Histogramas de magnitude absoluta e massado virial para as duas amostras.



Esquerda: Histograma da magnitude absoluta ( $M_r$ ) das galáxias contidas em cada uma das amostras, contendo 62 (laranja) e 177 (azul) aglomerados. Direita: Histograma da massa do virial ( $M_{200}$ ) para as duas referidas amostras.

nas imagens de raios X, temos que  $\sim 82\%$  são G e  $\sim 18\%$  são NG, em acordo com dC17 e (ROBERTS; PARKER, 2017). Desta forma, definimos as duas amostras utilizadas neste trabalho. Caracterizamos cada aglomerado quanto aos seus parâmetros dinâmicos, os centros aqui considerados e as galáxias membro. Estimamos ainda os parâmetros de idade, metalicidade e massa estelar, descritivos da população estelar de cada galáxia. Classificamos os aglomerados de acordo com a gaussianidade da distribuição de velocidade, sendo então criados dois subgrupos em cada amostra: os aglomerados gaussianos (G) e os não-gaussianos (NG). No próximo capítulo apresentamos os principais resultados deste estudo. Investigamos neste trabalho duas amostras: Amostra 1 - constituída por 177 aglomerados cujos centros são definidos a partir da observação no óptico; Amostra 2, composta por 62 aglomerados para os quais os centros foram definidos a partir dos mapas em raios X. No Apêndice B apresentamos, para a amostra 2, a distribuição de galáxias discriminadas nos regimes de

AF e BF, o correspondente mapa de densidade e as imagens de raios X do ROSAT e de XMM, quando disponível. Examinamos em detalhes 3 casos que apresentaram características atípicas no Apêndice C. Durante esse trabalho utilizamos o modelo  $\Lambda$ CDM com  $H_0 = 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_M = 0.27$  e  $\Omega_\Lambda = 0.73$ .

### 3 RESULTADOS

Neste capítulo apresentamos os resultados da análise de uma amostra de aglomerados de galáxias com base no catálogo de [Yang et al. \(2007\)](#), como descrita no Capítulo 2. Discutimos como as várias regiões do EFP são definidas e a motivação para tal, em particular quatro formas diferentes de dividir o EFP são analisadas. Considerando que o número de galáxias por aglomerado não é o suficiente para detalhar a relação entre o estado dinâmico do aglomerado e as características das populações estelares de suas galáxias membro, utilizamos a técnica de acumular os EFPs de aglomerados (“stack”), segundo a classificação em G e NG. Mostramos que as distribuições dos parâmetros Idade, metalicidade e massa estelar apresentam diferenças significativas para aglomerados G e NG, reforçando o fato de que a classificação baseada na distribuição de velocidades efetivamente identifica dois grupos distintos de aglomerados segundo seu estágio dinâmico. Usamos também a distância entre os centros óptico e de raios X ( $d_{\text{opt,rx}}$ ) como indicador do estágio dinâmico do aglomerado e encontramos evidência de que este parâmetro também identifica duas famílias de aglomerados.

### 3.1 Definição do espaço de fase projetado

Nos séculos após a introdução das Leis de Newton, um grande número de trabalhos teóricos foram desenvolvidos sobre a evolução dinâmica dos sistemas físicos (por exemplo os trabalhos de Euler, Laplace, Lagrange e Hamilton, para citar alguns). Consideremos um sistema físico Newtoniano que consiste de um número finito de partículas. No tratamento lagrangeano considera-se que existe um “espaço de configurações” onde cada ponto representa um único arranjo espacial de todas as partículas do sistema assim definido. Na medida que o tempo passa, um único ponto neste “espaço de configurações” move-se de acordo com as leis encapsuladas na teoria Newtoniana. A função definida no espaço de configurações define o que chamamos de “espaço de fase”, que fornece a base para o estudo do movimento do sistema supra citado.

Nesta seção apresentamos as grandezas utilizadas na definição do EFP para cada um dos aglomerados aqui estudados. O cálculo da distância radial projetada,  $R_{\text{proj}}$ , de cada galáxia membro ao centro do aglomerado é feito utilizando a definição de distância de diâmetro angular ( $d_A$ ). De forma resumida,  $d_A$  serve como fator de proporcionalidade entre a distância angular medida e a distância física correspondente. Dessa forma,  $R_{\text{proj}}$  pode ser expressa em função da AR e DEC como

$$R_{\text{proj}} = d_A(z_{\text{agl}}) \tan(\chi) \quad (3.1)$$

onde  $\chi$  é expresso como

$$\chi = \cos^{-1}(\sin(\delta) \sin(\delta_C) + \cos(\delta) \cos(\delta_C) \cos(\alpha - \alpha_C)) \quad (3.2)$$

onde  $z_{\text{agl}}$  é calculado como a mediana dos redshifts de todas as galáxias membro,  $\chi$  a distância angular entre a galáxia e o centro do sistema, expressa em função de  $\alpha$  (AR) e  $\delta$  (DEC) da galáxia e do centro (subscrito C). Por sua vez, a velocidade projetada ao longo da linha de visada de cada galáxia membro,  $v_{\text{LDV}}$ , é calculada como

$$v_{\text{LDV}} = c \frac{z_{\text{gal}} - z_{\text{agl}}}{1 + z_{\text{agl}}} \quad (3.3)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $z_{\text{gal}}$  e  $z_{\text{agl}}$  são os redshifts da galáxia e do centro do aglomerado, respectivamente.

No entanto, o EFP construído dessa forma não permite a comparação entre sistemas, que apresentam parâmetros característicos diferentes. Adotamos aqui então a hipó-

tese de homologia, a qual afirma que os sistemas são estruturalmente equivalentes, diferindo apenas pelas escalas de comprimento ( $R_{200}$ ) e dispersão de velocidade ( $\sigma$ ). Logo, utilizando estes fatores como normalização, a comparação torna-se consistente.  $R_{200}$  e  $\sigma$  são calculados utilizando a técnica de “Shiftgapper” (e.g. dC17).

Devido à simetria presente no problema, utilizamos os valores absolutos no eixo de velocidade. Essa abordagem segue a prescrição apresentada em Rhee et al. (2017) e Pasquali et al. (2019), onde utiliza-se o módulo da velocidade para definir o EFP (ver Seção 1.9).

As amostras aqui utilizadas possuem uma grande variedade de riqueza dos aglomerados, variando de  $\sim 20$  a 1000 galáxias membro. Como consequência, encontramos regiões do EFP povoadas por poucas galáxias para alguns aglomerados. Portanto, um procedimento usual é considerar um único EFP com todas as galáxias membro de todos os aglomerados, que compartilham uma certa propriedade, denominado Espaço de Fase Projetado Acumulativo (EFPA). Com isso, aumentamos o número de galáxias por aglomerado e diminuímos a variância associada aos parâmetros de população estelar em cada região. Construimos EFPAs para cada regime de magnitude (AF e BF) e classe de aglomerado (G e NG).

### 3.1.1 Estudo do espaço de fase projetado de acordo com Rhee et al. (2017)

Em primeira aproximação podemos dizer que diferentes regiões do EFP representam galáxias em diferentes órbitas. O objetivo central deste trabalho é relacionar as diferentes regiões do EFP com a população estelar das galáxias presentes nas mesmas. Como discutido no Capítulo 1, os efeitos de projeção afetam diretamente a definição das diferentes regiões no EFP, que não podem ser definidas de forma absoluta. Contudo, podemos utilizar simulações cosmológicas, onde temos conhecimento da distribuição em 3D, para definir regiões do EFP de maneira probabilística. Assim, diferentes regiões podem ser definidas no EFP com base em um parâmetro físico que varie consideravelmente com as regiões.

Rhee et al. (2017) utilizam a simulação YZiCS, descrita na Seção 1.9, para definir regiões no EFP de acordo com o tempo de “infall”<sup>1</sup>,  $t_{\text{inf}}$ , das galáxias no aglomerado. O tempo no qual a galáxia está sob o efeito do ambiente é um parâmetro de extrema importância para o estudo do efeito ambiental na evolução de uma galáxia. No caso

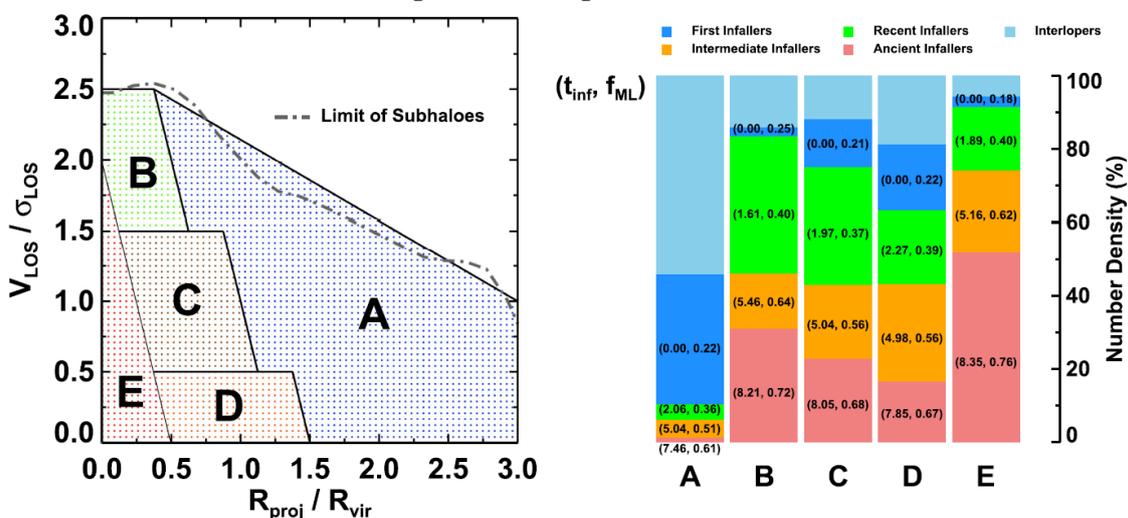
---

<sup>1</sup>Como a tradução de “infall” e “infallers” não nos parece refletir o conceito físico adequadamente, utilizamos o termo em inglês.

de aglomerados de galáxias, isso traduz-se em estimar quanto tempo a galáxia está sob efeito do MIA e do potencial global do sistema. As regiões no EFP são definidas de forma a definir uma população de galáxias com um mesmo tempo de “infall”. Os regimes de  $t_{\text{inf}}$  considerados nessa forma de dividir o EFP são:

- Galáxias “First infallers” (B): ainda não foram acretadas ao aglomerado, mas estão sob o efeito do seu potencial,  $t_{\text{inf}} = 0$ ;
- Galáxias “Recent infallers” (C): galáxias com  $0 < t_{\text{inf}} < 3.63$  Ga;
- Galáxias “Intermediate infallers” (D): galáxias com  $3.63 < t_{\text{inf}} < 6.45$  Ga;
- Galáxias “Ancient infallers” (E): galáxias com  $6.45 < t_{\text{inf}} < 13.7$  Ga;
- Galáxias “Interlopers” (A): galáxias que, por efeito de projeção, parecem estar ligadas ao sistema, quando na verdade não estão;

Figura 3.1 - Regiões de Rhee.



Esquerda: As regiões do EFP definidas de acordo com Rhee et al. (2017). Direita: a probabilidade de encontrar uma dada população na região. Os números em parênteses mostram o tempo médio de “infall” e a fração média de perda de massa para cada população em cada região.

Fonte: Rhee et al. (2017).

A Figura 3.1 mostra as diferentes regiões do EFP definidas por Rhee et al. (2017), que de aqui em diante serão referenciadas como regiões de Rhee. Destacamos aqui a grande área do EFP ocupada pela região A. No entanto, é importante lembrar que

neste trabalho estaremos usando somente galáxias membro segundo a técnica de shiftgapper e, a princípio, nenhuma galáxia é espúria. O percentual real de galáxias na região A mostra a discordância entre os critérios adotados por Rhee et al. (2017) e a técnica de “Shiftgapper”, discutida em Lopes et al. (2008). Decidimos então utilizar os parâmetros de população estelar de galáxias na região A como uma aproximação dos parâmetros encontrados em galáxias em regimes de baixa densidade (campo). Dessa forma podemos comparar os parâmetros de população estelar de galáxias em regimes de baixa e alta densidade (regiões E, B, C, D), mas com diferentes tempos de “infall”.

Rhee et al. (2017) também analisam os valores médios da fração de perda de massa,  $f_{PM}$ , de cada região. Ao entrar no aglomerado, uma galáxia pode sofrer perda de massa causada por efeitos de maré. A razão entre a massa perdida e a massa total da galáxia antes de entrar no aglomerado define a fração de perda de massa. Assim, existe uma relação direta entre  $t_{inf}$  e  $f_{PM}$ . Quanto maior  $t_{inf}$ , por mais tempo a galáxia sofre os efeitos de maré e, conseqüentemente, mais massa é perdida, aumentando  $f_{PM}$ . O tempo médio de “infall” e a fração média de perda de massa para cada população em cada região são apresentados entre parênteses no painel direito da Figura 3.1.

A abordagem para definir diferentes regiões do EFP adotada por Rhee et al. (2017) não é única. Mahajan et al. (2011) e Pasquali et al. (2019) apresentam duas outras formas de dividir o EFP. Aqui não utilizaremos a divisão de Mahajan et al. (2011), uma vez que, embora regiões “virial” e “infall” tenham uma probabilidade de identificação de galáxias que realmente pertencem a essas regiões, o mesmo não acontece com a região de ricocheteio. Assim, esta divisão do EFP torna-se pouco confiável. Na próxima seção descrevemos o trabalho de Pasquali et al. (2019), o qual fornece mais três formas de dividir o EFP.

### **3.1.2 Três outras formas de dividir o espaço de fase projetado: Pasquali et al. (2018)**

Pasquali et al. (2019) utilizam a mesma simulação que Rhee et al. (2017) para definir três outras formas de dividir o EFP. As divisões são feitas de forma a também rastrear o tempo de infall de galáxias em uma determinada região. Para isso, Pasquali et al. (2019) criam um EFP com todas as galáxias da simulação e o particiona em uma grade quadrada, onde em cada partição é calculado o tempo médio de infall das galáxias ali contidas. Assim, Pasquali et al. (2019) constroem a distribuição do tempo de “infall” para o EFP e o particiona de diversas formas, com o intuito de investigar qual melhor se adequa à distribuição de  $t_{inf}$  medida. A distribuição é apresentada

na Figura 3.2, onde cada partição é colorida de acordo com  $t_{\text{inf}}$  correspondente.

Uma das formas consideradas trata-se da divisão por bins radiais, que é comumente utilizada para estudar a variação dos parâmetros das galáxias em função da distância radial projetada ao centro do aglomerado. Seguindo prescrição de Pasquali et al. (2019), o EFP é dividido em 8 partições radiais de largura  $0.125 R_{200}$  e a análise dos parâmetros limitada a  $1R_{200}$ . Contudo, nota-se que essa forma de dividir o EFP não se adequa a distribuição de  $t_{\text{inf}}$  resultante.

Pasquali et al. (2019) investigam uma forma alternativa de dividir o EFP utilizando cáusticas<sup>2</sup>. A constante que relaciona  $v_{\text{LDV}}$  e  $R_{200}$  determina a energia cinética (velocidade) da galáxia ao realizar passagens pericêntricas. A dissipação de energia da galáxias devido ao seu movimento no aglomerado reduz constantemente sua velocidade e, conseqüentemente, em suas passagens pericêntricas. Portanto, essa constante é maior para galáxias na primeira passagem e menor para galáxias já virializadas. Utilizamos 5 curvas cáusticas, com  $\text{cte} = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75$  e  $1$ , definindo 6 regiões diferentes. As constantes foram utilizadas por Pasquali et al. (2019) com o intuito de criar regiões distribuídas de forma semelhante à distribuição de “infall” observada. Novamente, assim como no caso de bins radiais, limitamos esta divisão a  $1R_{200}$ .

A terceira forma de dividir o EFP investigada por Pasquali et al. (2019) consiste em definir curvas analíticas no EFP de forma a rastreamos o comportamento observado para a distribuição do tempo de “infall”. A forma analítica de cada curva é dada por:

$$\frac{|v_{\text{LOS}}|}{\sigma} = a \left( \frac{R_{\text{proj}}}{R_{200}} \right)^2 + b \left( \frac{R_{\text{proj}}}{R_{200}} \right) + c, \quad (3.4)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes, que podem ser escritas em função de um parâmetro inteiro  $p$ , com valores entre 1 a 7, como:

$$a = 0.022p^3 + 0.512p^2 + 3.287p + -2.786 \quad (3.5)$$

$$b = 0.184p^2 - 1.494p - 3.5 \quad (3.6)$$

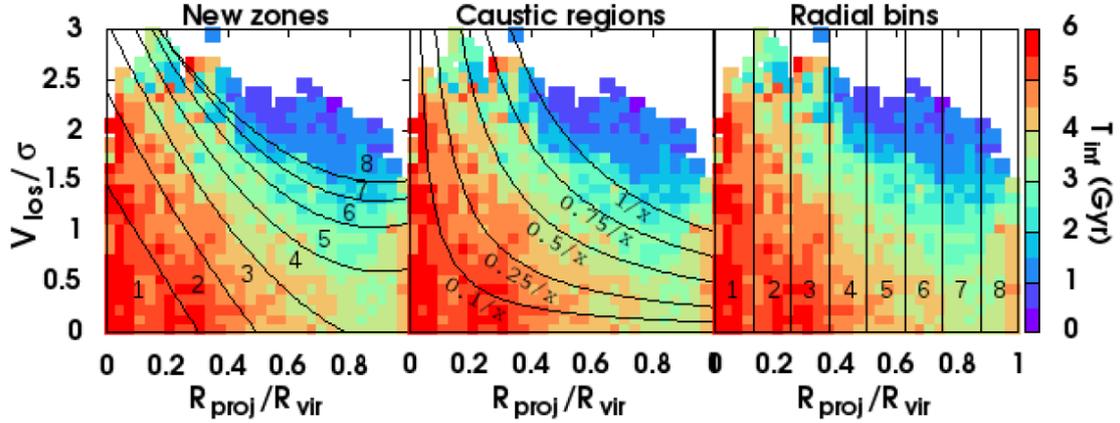
$$c = -0.108p^2 + 1.249p + 0.314. \quad (3.7)$$

Escolhendo  $p = 1$  resulta na linha dividindo as zonas 1 e 2, por exemplo. As 8 diferentes zonas são mostradas na Figura 3.2. Destacamos que as curvas apresentadas só possuem validade para  $R/R_{200} \leq 1$ . Assim, as New Zones de Pasquali (NZPs) constituem a quarta forma de dividir o EFP considerada neste trabalho. A Tabela

---

<sup>2</sup>Curvas Cáusticas são definidas por meio da equação  $v_{\text{LDV}}/\sigma = \text{cte} \times R_{\text{proj}}/R_{200}$ .

Figura 3.2 - Regiões definidas em Pasquali et al. (2019)



O EFP dividido de acordo com as NZPs. Note que as regiões são definidas de forma que a cor dos pixels (e então  $t_{\text{inf}}$ ) contidos nela sejam o mais uniforme possível. Fonte: Pasquali et al. (2019).

3.1 apresenta a média e o desvio padrão da distribuição do tempo de “infall” de cada zona. Por construção, é possível perceber que o tempo de “infall” médio diminuí com o aumento do número da zona. No entanto, o desvio padrão para regiões de menor tempo de “infall” é consideravelmente grande, sendo maior que a própria medida da média no caso na zona 8. As três formas de dividir o EFP apresentados por

Tabela 3.1 - O tempo médio de infall e o desvio padrão (calculado a partir de quartis da distribuição) para cada NZP.

NZP	1	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{t}_{\text{inf}}$ (Ga)	5.42	5.18	4.50	3.89	3.36	2.77	2.24	1.42
$\sigma_{\bar{t}_{\text{inf}}}$ (Ga)	2.51	2.60	2.57	2.34	2.36	2.29	1.97	1.49

Pasquali et al. (2019) são baseados em parâmetros distintos. Bins radiais dividem a população dos aglomerados de acordo com a distância ao centro dos mesmos, zonas cáusticas separam as galáxias de acordo com a sua energia cinética durante a passagem pericêntrica e as NZPs as dividem de acordo com o tempo de infall. Dentre as três formas de dividir o EFP propostas por Pasquali et al. (2019), bins radiais são a com menor acurácia quanto ao rastreamento do tempo de “infall”. Portanto, bins radiais realizam um papel secundário na análise subsequente, em sua maioria

sendo utilizado para confirmar tendências observadas a partir de outras formas de dividir o EFP.

### 3.2 Aglomerados em diferentes estágios dinâmicos

Aglomerados são caracterizados por possuírem uma alta densidade, a qual afeta a evolução de galáxias membro. No Capítulo 1 discutimos os mecanismos que retiram o gás das galáxias, causando um processo de truncamento de formação estelar. Dentre os principais processos que uma galáxia sofre ao mover-se no aglomerado, a pressão de arraste gerada pelo gás quente presente no MIA destaca-se pela alta eficiência em retirar o gás do sistema. Não obstante, o PTFE depende diretamente de características intrínsecas do aglomerado (densidade do MIA, por exemplo). Trabalhos recentes (e.g. dC17 e Roberts e Parker (2017)) utilizam o estágio dinâmico de aglomerados para caracterizar diferentes ambientes nos quais galáxias se localizam. Uma das possibilidades de se caracterizar o estágio dinâmico de um aglomerado é através da medida de gaussianidade de sua distribuição de velocidades. Cabe ressaltar que esta associação, embora possa ser feita em uma primeira aproximação, não necessariamente se aplica (dC17). Neste trabalho também consideramos a gaussianidade da distribuição de velocidades como um indício de maior proximidade do sistema ao seu estado de equilíbrio e investigamos diferentes propriedades das galáxias em aglomerados G e NG definidos nas amostras apresentadas no Capítulo 2.

Notamos inicialmente da Tabela 3.2 que o percentual de galáxias tanto de AF como de BF ocupando a região A de aglomerados NG é consideravelmente maior do que sua contraparte em sistemas G, 42% vs 27% e 46% vs 29%, respectivamente. É importante lembrar que todas as galáxias associadas aos aglomerados deste trabalho são consideradas membros segundo a técnica de shigtgapper. Rhee et al. (2017) considera que esta região possui estatisticamente  $\sim 55\%$  de galáxias “espúrias” e  $\sim 30\%$  de “first infallers”. Logo interpretamos esta região como representando o regime de mais baixa densidade dos aglomerados, próximo à densidade do campo geral, e portanto importante para a caracterização de processos evolutivos que dependam criticamente da densidade.

Tabela 3.2 - A porcentagem de galáxias em aglomerados G e NG na região A, para ambos os regimes de magnitude.

	$G_{AF}$	$NG_{AF}$	$G_{BF}$	$NG_{BF}$
% de Galáxias	$27 \pm 9$	$42 \pm 8$	$29 \pm 11$	$46 \pm 6$

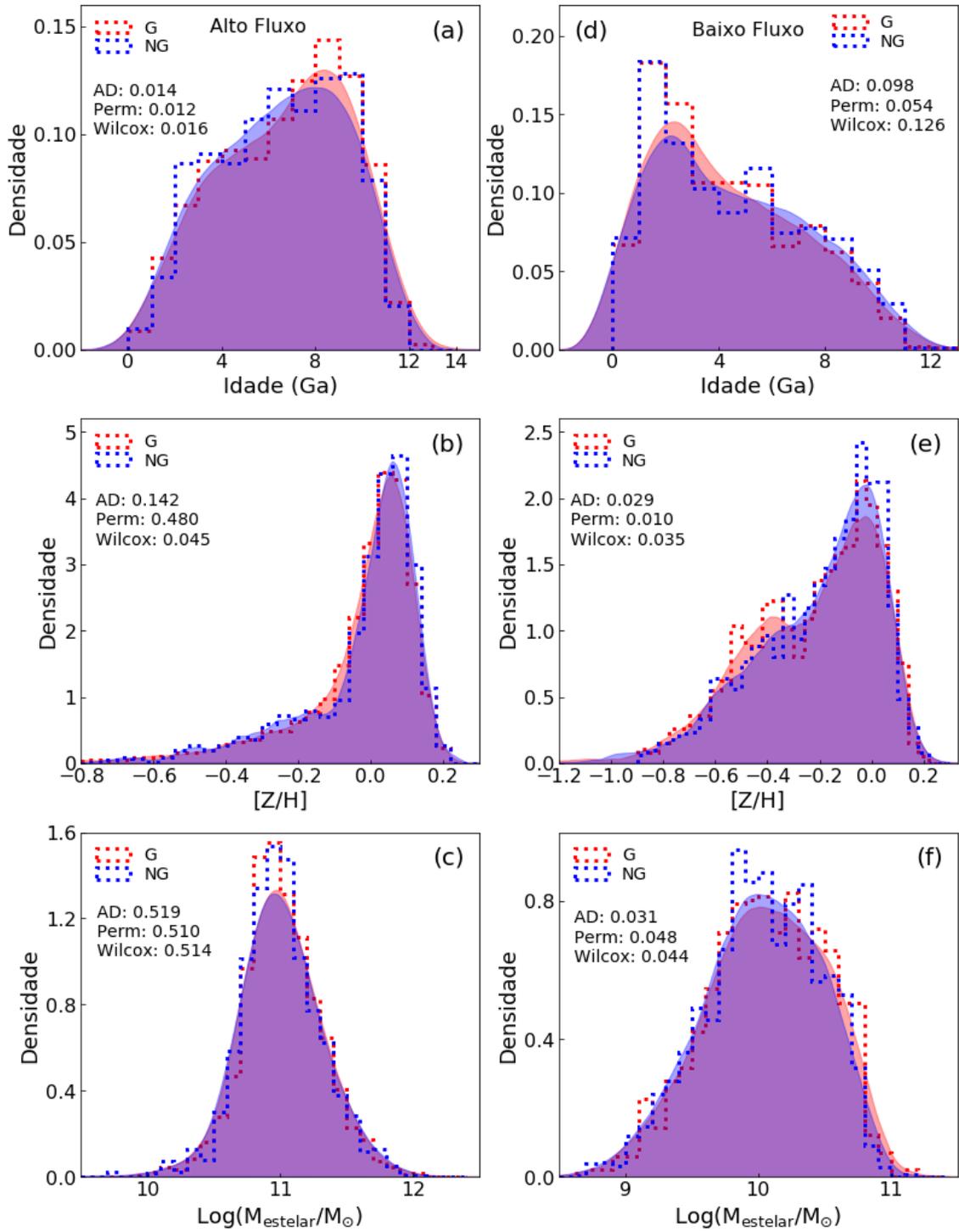
Na Figura 3.3 apresentamos as distribuições de Idade, metalicidade ( $[Z/H]$ ) e massa estelar ( $M_{\text{estelar}}$ ) de galáxias de AF e BF em aglomerados G e NG. Neste trabalho a semelhança estatística entre duas distribuições é avaliada por meio de três testes estatísticos distintos<sup>3</sup> e adotamos um nível de significância de  $\alpha = 0.05$ . No Apêndice D apresentamos brevemente cada um dos testes mencionados e discutimos a utilização de testes estatísticos em geral na astronomia. Quanto as distribuições apresentadas na Figura 3.3, encontramos que as distribuições são estatisticamente diferentes (p-values listados na própria figura), com exceção de massa estelar e metalicidade de galáxias de AF. Dentre os pontos destacáveis, temos: 1) no painel (d) notamos um pequeno excesso de galáxias de BF com Idade  $> 5$  Ga em aglomerados NG em comparação a aglomerados G; 2) no painel (e) encontramos que sistemas G possuem um excesso de galáxias de BF com  $[Z/H] < -0.3$ , enquanto que galáxias com  $[Z/H] > -0.3$  estão mais presentes em aglomerados NG. Estas pequenas tendências serão verificadas mais adiante quando feita a análise mais detalhada do EFP. dC17 mostra que galáxias em regiões periféricas de aglomerados NG possuem maior idade e  $[Z/H]$  do que as encontradas em sistemas G. Logo, diferenças na distribuição global dos parâmetros de população estelar de galáxias em aglomerados G e NG podem corresponder a diferentes órbitas que estas galáxias possuem dentro do sistema (primeira passagem, ricocheteio, virializada). Portanto, utilizamos o EFP para investigar as diferentes propriedades de galáxias ocupando regiões específicas no EFP de cada uma das duas classes.

### 3.3 Virial vs “Infall”

Na Seção 3.1 mostramos como Rhee et al. (2017) e Pasquali et al. (2019) subdividem o EFP em termos de  $t_{\text{inf}}$ . Entretanto, numa primeira etapa examinamos as duas grandes regiões: virial (E) e “infall” (B + C + D). Na Figura 3.4 apresentamos as comparações dos parâmetros Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  de galáxias de AF nas

<sup>3</sup>Teste de permutação (“permTS do pacote em R “perm”), teste de Anderson-Darling (“ad.test” do pacote “kSamples”, também em R) e teste de Wilcoxon (“wilcox.test”, disponível no pacote em R “ggpubr”).

Figura 3.3 - Distribuições dos parâmetros de população estelar

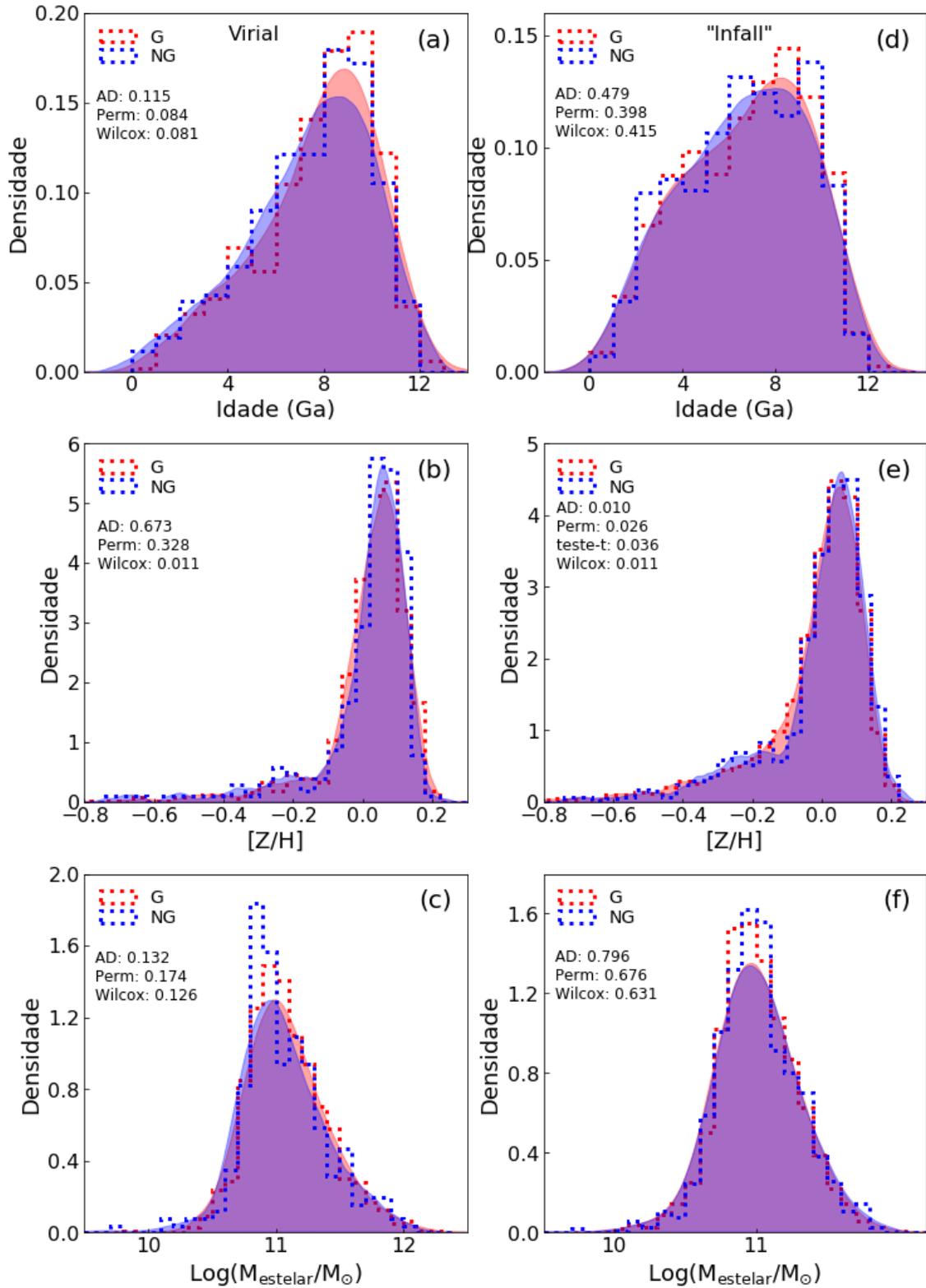


Distribuições dos parâmetros Idade (acima),  $[Z/H]$  (meio) e  $M_{\text{estelar}}$  (inferior) de galáxias de AF (painéis esquerdos) e de BF (à direita) em aglomerados G e NG. Em cada painel apresentamos os p-values calculados utilizando teste Anderson-Darling (AD), teste de permutação (perm) e teste Wilcoxon (Wilcox).

regiões virial e “infall” de aglomerados G e NG. Notamos que as distribuições são estatisticamente semelhantes (vide os p-value listados) com exceção do parâmetro de metalicidade das galáxias da região de “infall” (painel e), onde para  $[Z/H] > 0.0$  existe um excesso de galáxias com maior valor de  $[Z/H]$  nos aglomerados NG.

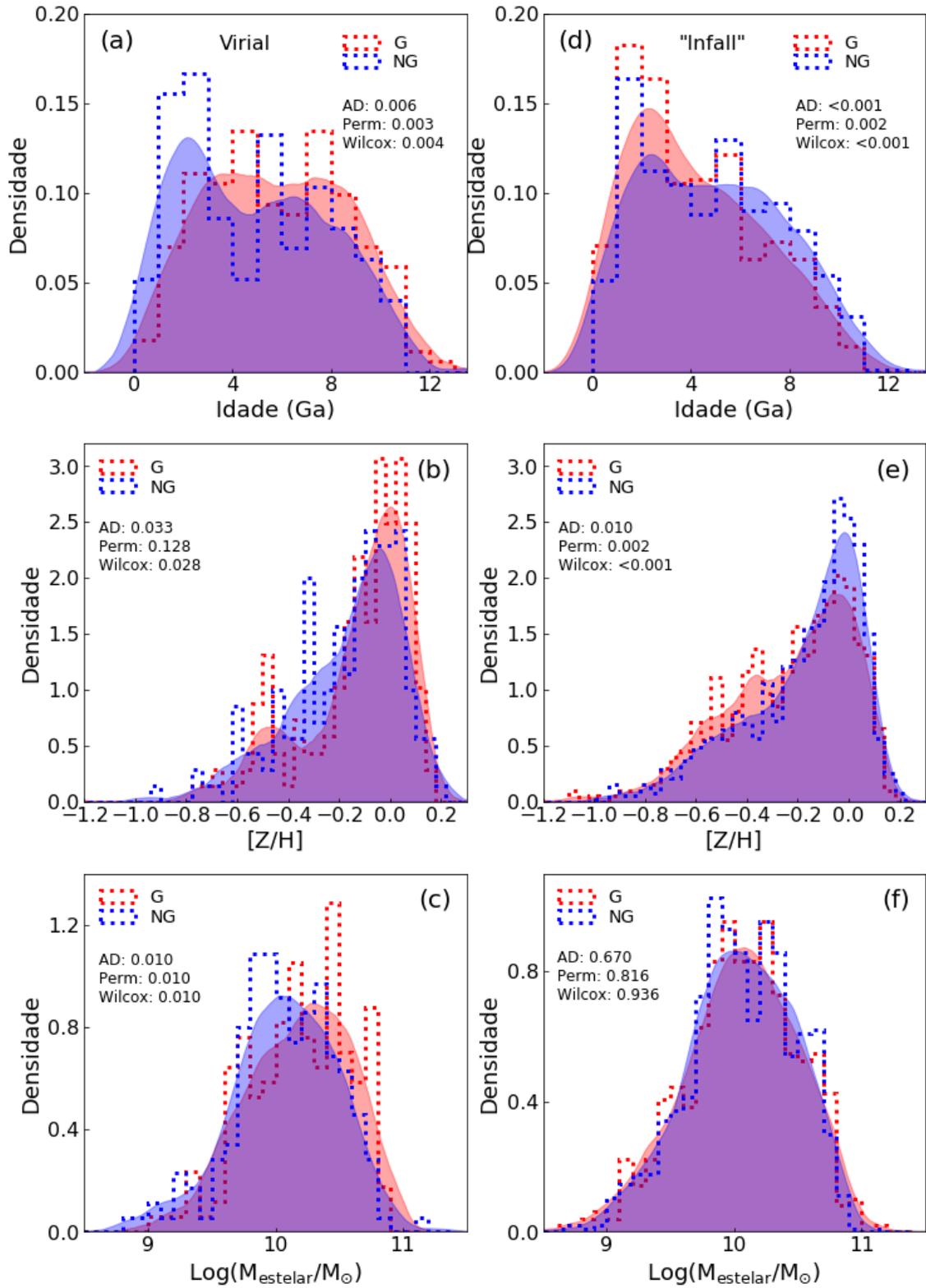
Na Figura 3.5 apresentamos as mesmas comparações da Figura 3.4, agora para o caso das galáxias do regime de BF. Notamos que existe uma diferença estatisticamente significativa entre todos os parâmetros quando comparamos as regiões virial e “infall” de aglomerados G e NG, exceto para a massa estelar que na região de “infall” não possui diferença entre sistemas G e NG. Alguns pontos são dignos de nota, a saber: 1) no painel (a), região do virial, notamos que existe proporcionalmente um excesso de galáxias jovens nos sistemas NG em relação aos G. Este excesso fica evidenciado pelo deslocamento da distribuição de  $M_{\text{estelar}}$  para maiores valores (distribuição vermelha em relação à azul); 2) no painel (c) notamos que em geral a distribuição de  $M_{\text{estelar}}$  das galáxias da região virial de sistemas G é significativamente maior do que aquelas nos sistemas NG; no painel (d) a região de “infall” de sistemas G possui um excesso de galáxias com idades até 5 Giga anos enquanto que galáxias com idades maiores do que 6 Giga anos dominam os sistemas NG; e finalmente no painel (e) notamos um excesso de galáxias com  $[Z/H] > -0.1$  nos sistemas NG em relação aos sistemas G. Importante ressaltar que as diferenças aqui observadas entre galáxias de sistemas G e NG, estão de acordo com trabalhos anteriores (e.g, dC17).

Figura 3.4 - Distribuições dos parâmetros de população estelar na região do virial e de “infall”



Painéis superiores: Idade, painéis centrais:  $[Z/H]$  e painéis inferiores:  $M_{\text{estelar}}$  de galáxias de AF nas regiões de virialização (à esquerda) e “infall” (a direita) de aglomerados G e NG. Em cada painel apresentamos também os p-values obtidos por meio de dois métodos distintos: Teste Anderson-Darling (AD), Teste de Permutação (Perm) e Wilcoxon (Wilcox).

Figura 3.5 - Semelhante a Figura 3.4, mas para galáxias de BF.



### 3.4 Caracterização de regiões específicas do EFP de aglomerados G e NG

Nas seções anteriores apresentamos diferenças entre galáxias membro de aglomerados G e NG utilizando distribuições dos parâmetros de forma global e/ou separando-as de acordo seu estágio dinâmico (“virializada” ou “infall”). Analisamos agora as diferenças em cada uma das regiões específicas do EFP com o intuito de relacionar o histórico de formação estelar das galáxias membro com o estágio dinâmico do sistema. Caracterizamos cada região de acordo com a porcentagem de galáxias nela contida em relação ao conjunto de galáxias membro, e a média dos parâmetros de população estelar das galáxias da referida região. Apresentamos no Apêndice E os métodos aqui utilizados para o cálculo da variância associada a estes parâmetros em cada região.

#### 3.4.1 O EFP dividido à la Rhee

As regiões de Rhee possibilitam um estudo do EFP de aglomerados de acordo com o  $t_{\text{inf}}$  de suas galáxias membro. Encontramos diferenças entre aglomerados G e NG não somente sobre a ocupação do EFP, mas também quanto aos parâmetros de população estelar de galáxias ocupando regiões de Rhee específicas. Notamos primeiramente da Tabela 3.3 que as diferenças percentuais<sup>4</sup> de ocupação das várias regiões de Rhee não são significativas, nem no regime AF nem no BF. São todas diferenças dentro de  $1\sigma$ .

No que diz respeito aos parâmetros que caracterizam a população estelar, notamos algumas importantes diferenças e tendências. Em termos do parâmetro Idade, notamos um gradiente das regiões E para A, com  $\Delta\text{Idade} = 1.83$  Ga para aglomerados G e 1.30 Ga para aglomerados NG, no regime AF. No regime BF o mesmo gradiente tem valor de 2.10 Ga para os aglomerados G e para os aglomerados NG este gradiente não é claramente evidente. Aqui notamos uma variação ao longo da sequência E para A com amplitude de cerca de 0.91 Ga. As tendências em  $[Z/H]$  são semelhantes às das Idades. Neste caso notamos que entre as regiões E e A a metalicidade diminui, ou seja, os sistemas são menos ricos em metais quanto menor é o tempo de “infall”, seja no regime de AF ou BF. Além disso, notamos que os valores de  $[Z/H]$  em si são menores em aglomerados NG em relação aos G, independente do regime de luminosidade. Finalmente,  $M_{\text{estelar}}$  não apresenta nenhuma tendência importante, sendo basicamente constante das regiões E para A, para ambos os regimes de magnitude

---

<sup>4</sup>Nesse caso as porcentagens foram calculadas como  $N_i/N_{E+B+C+D}$ , onde  $N_i$  é o número de galáxias na região  $i = E, B, C$  ou  $D$  e  $N_{E+B+C+D}$  é a soma de galáxias nestas regiões.

e em aglomerados G e NG. A Figura 3.6 sumariza esses resultados.

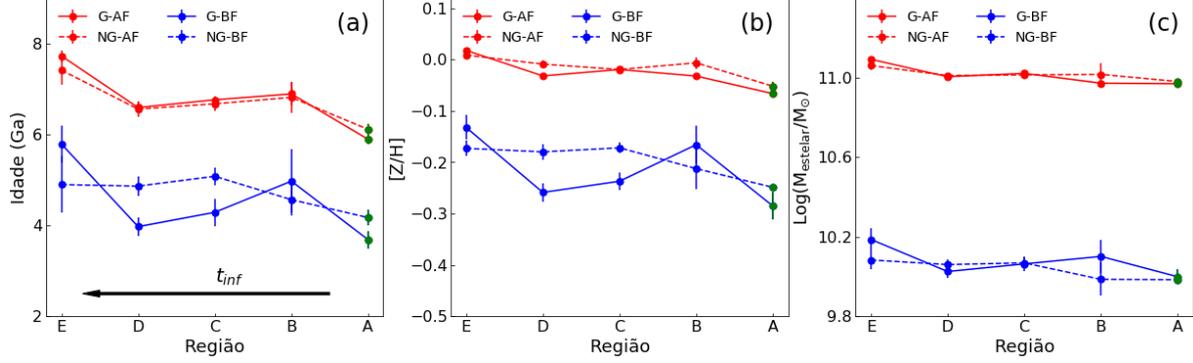
Tabela 3.3 - Porcentagem de ocupação das regiões de Rhee e valores médios de Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$ . Os resultados são dividido entre galáxias em aglomerados G e NG e de acordo com o regime de magnitude. Em verde destacamos os parâmetros de população estelar resultantes da análise de galáxias na região A, associada a regiões de baixa densidade.

Região de Rhee	E	B	C	D	A
Galáxias <sub>G</sub> <sup>AF</sup> (%)	27 ± 9	10 ± 4	35 ± 8	28 ± 9	—————
Galáxias <sub>NG</sub> <sup>AF</sup> (%)	20 ± 9	8 ± 5	38 ± 12	34 ± 11	—————
Galáxias <sub>G</sub> <sup>BF</sup> (%)	26 ± 11	9 ± 6	34 ± 9	31 ± 10	—————
Galáxias <sub>NG</sub> <sup>BF</sup> (%)	15 ± 11	5 ± 6	43 ± 14	37 ± 12	—————
Idade <sub>G</sub> <sup>AF</sup> (Ga)	7.72 ± 0.13	6.89 ± 0.23	6.76 ± 0.08	6.59 ± 0.11	5.89 ± 0.12
Idade <sub>NG</sub> <sup>AF</sup> (Ga)	7.41 ± 0.32	6.81 ± 0.25	6.67 ± 0.16	6.56 ± 0.17	6.11 ± 0.13
Idade <sub>G</sub> <sup>BF</sup> (Ga)	5.79 ± 0.41	4.97 ± 0.70	4.29 ± 0.30	3.97 ± 0.20	3.69 ± 0.19
Idade <sub>NG</sub> <sup>BF</sup> (Ga)	4.90 ± 0.62	4.56 ± 0.34	5.08 ± 0.19	4.86 ± 0.21	4.17 ± 0.17
$[Z/H]_G^{\text{AF}}$	0.018 ± 0.003	-0.032 ± 0.005	-0.019 ± 0.002	-0.032 ± 0.003	-0.066 ± 0.005
$[Z/H]_{\text{NG}}^{\text{AF}}$	0.009 ± 0.006	-0.006 ± 0.012	-0.019 ± 0.005	-0.009 ± 0.007	-0.052 ± 0.009
$[Z/H]_G^{\text{BF}}$	-0.132 ± 0.024	-0.166 ± 0.037	-0.237 ± 0.011	-0.259 ± 0.015	-0.285 ± 0.027
$[Z/H]_{\text{NG}}^{\text{BF}}$	-0.173 ± 0.016	-0.212 ± 0.040	-0.172 ± 0.035	-0.180 ± 0.030	-0.249 ± 0.007
$\text{Log}(M_{\text{estelar}}/M_{\odot})_G^{\text{AF}}$	11.09 ± 0.01	10.97 ± 0.02	11.02 ± 0.01	11.00 ± 0.01	10.97 ± 0.01
$\text{Log}(M_{\text{estelar}}/M_{\odot})_G^{\text{AF}}$	11.06 ± 0.02	11.02 ± 0.06	11.01 ± 0.01	11.01 ± 0.01	10.98 ± 0.01
$\text{Log}(M_{\text{estelar}}/M_{\odot})_G^{\text{BF}}$	10.19 ± 0.06	10.10 ± 0.08	10.06 ± 0.04	10.02 ± 0.03	10.00 ± 0.04
$\text{Log}(M_{\text{estelar}}/M_{\odot})_{\text{NG}}^{\text{BF}}$	10.08 ± 0.05	9.99 ± 0.08	10.07 ± 0.03	10.06 ± 0.02	9.98 ± 0.02

### 3.4.2 O EFP dividido em New Zones de Pasquali

Como discutido na Seção 3.1.2, Pasquali et al. (2019) examinam diferentes formas de subdividir o EFP e concluem que as denominadas “New Zones” são as que melhor representam variações no tempo de “infall”, tendo melhor performance do que “bins radiais” e “zonas cáusticas”. Assim, nesta seção examinaremos o EFP segundo a subdivisão de “New Zones”, referenciadas como NZPs (“New Zones de Pasquali”). Diferentemente das regiões de Rhee, as NZPs são, por construção, as regiões que

Figura 3.6 - Valores médios de Idade (esquerda),  $[Z/H]$  (meio) e  $M_{\text{estelar}}$  (direita) de galáxias em aglomerados G e NG para cada região de Rhee, separados de acordo com o regime de magnitude. Em verde ressaltamos os parâmetros representativos de galáxias na região A.



melhor se ajustam à distribuição do tempo de “infall” de galáxias no EFP da simulação YZiCS. A estatística destas regiões é listada na Tabela 3.4 e na Figura 3.7. Notamos que não existe uma diferença significativa de ocupação do EFP em relação aos aglomerados G e NG em ambos os regimes de luminosidade. Todas as diferenças encontram-se dentro de  $1\sigma$ .

Quanto aos parâmetros de população estelar, notamos tendências estatisticamente significativas, dentre as quais destacamos:

- um gradiente em Idade entre as regiões 1 e 8. No regime de AF esse gradiente é mais pronunciado para aglomerados G ( $\Delta\text{Idade} \sim 2$  Ga) que em sistemas NG ( $\Delta\text{Idade} \sim 1.2$  Ga). A diferença em gradientes mostra uma sistemática das idade das galáxias em sistemas NG serem menores para maiores valores de  $t_{\text{inf}}$  e maiores para menores valores de  $t_{\text{inf}}$ ;
- Examinando o regime de BF, verificamos a mesma tendência que é observada para o regime de AF, ou seja, em sistemas NG observamos que somente nas duas primeiras regiões (altos  $t_{\text{inf}}$ ) a Idade das galáxias nestas regiões é menor do que nos sistemas G por  $\sim 0.8$  Ga. A partir da terceira região notamos que a Idade das galáxias em sistemas NG é em média 1.3 Ga maior. É também evidente que o gradiente de Idade é mais acentuado nos sistemas G do que em NG, onde basicamente não há gradiente;
- No regime AF,  $[Z/H]$  apresenta gradientes semelhantes para sistemas G e NG. No entanto, no regime de BF, a mesma tendência observada para

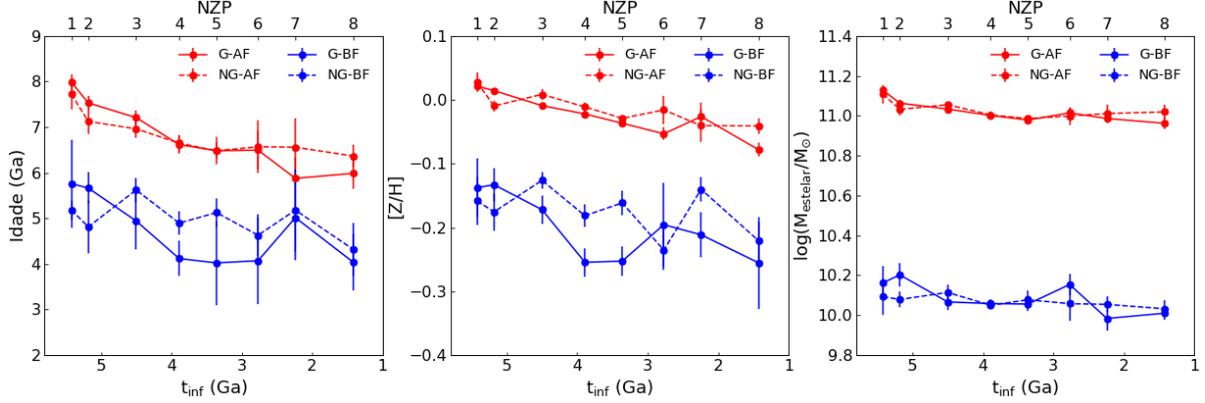
a Idade, nota-se aqui, ou seja, nas regiões de maior valor de  $t_{\text{inf}}$ ,  $[Z/H]$  de sistemas NG é menor por 0.04 dex do que os sistemas G e a partir da terceira região  $[Z/H]$  de sistemas NG é cerca de  $\sim 0.08$  maior, em média. Novamente,  $[Z/H]$  não parece ter um gradiente significativo para os sistemas NG, enquanto que para os sistemas G a variação de  $[Z/H]$  com  $t_{\text{inf}}$  é estatisticamente significativa ( $\Delta[Z/H] \sim 0.11$ );

- d) As tendências observadas para  $M_{\text{estelar}}$  seguem o mesmo padrão encontrado para Idade e  $[Z/H]$ . Novamente no regime de BF não encontramos nenhum gradiente de  $M_{\text{estelar}}$  com  $t_{\text{inf}}$ .

Tabela 3.4 - Porcentagem e Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  médias de galáxias encontradas em cada NFP. Os resultados são divididos entre galáxias em aglomerados G e NG e de acordo com o regime de magnitude.

NFP	1	2	3	4	5	6	7	8
Galáxias <sup>AF</sup> (%)	11 ± 8	17 ± 9	21 ± 7	24 ± 10	12 ± 7	5 ± 6	3 ± 3	8 ± 6
Galáxias <sup>AF</sup> <sub>NG</sub> (%)	8 ± 8	13 ± 7	22 ± 6	23 ± 8	14 ± 7	7 ± 3	4 ± 4	9 ± 8
Galáxias <sup>BF</sup> (%)	9 ± 5	20 ± 8	20 ± 6	25 ± 8	11 ± 5	5 ± 3	3 ± 4	7 ± 5
Galáxias <sup>BF</sup> <sub>NG</sub> (%)	4 ± 4	12 ± 7	18 ± 4	30 ± 4	15 ± 6	6 ± 3	3 ± 2	13 ± 4
Idade <sup>AF</sup> <sub>G</sub> (Ga)	7.99 ± 0.17	7.53 ± 0.14	7.20 ± 0.16	6.617 ± 0.19	6.48 ± 0.17	6.50 ± 0.41	5.88 ± 0.45	5.99 ± 0.34
Idade <sup>AF</sup> <sub>NG</sub> (Ga)	7.73 ± 0.34	7.13 ± 0.28	6.96 ± 0.20	6.65 ± 0.18	6.48 ± 0.30	6.57 ± 0.58	6.56 ± 0.63	6.37 ± 0.25
Idade <sup>BF</sup> <sub>G</sub> (Ga)	5.76 ± 0.97	5.66 ± 0.34	4.94 ± 0.62	4.12 ± 0.39	4.02 ± 0.92	4.07 ± 0.95	5.01 ± 0.93	4.04 ± 0.62
Idade <sup>BF</sup> <sub>NG</sub> (Ga)	5.18 ± 0.21	4.81 ± 0.58	5.62 ± 0.26	4.89 ± 0.26	5.13 ± 0.31	4.63 ± 0.46	5.18 ± 0.90	4.32 ± 0.58
$[Z/H]_{\text{G}}^{\text{AF}}$	0.0214 ± 0.006	0.014 ± 0.004	-0.009 ± 0.002	-0.022 ± 0.005	-0.036 ± 0.004	-0.053 ± 0.0102	-0.026 ± 0.0215	-0.0784 ± 0.010
$[Z/H]_{\text{NG}}^{\text{AF}}$	0.027 ± 0.014	-0.009 ± 0.008	0.008 ± 0.009	-0.011 ± 0.006	-0.029 ± 0.005	-0.016 ± 0.021	-0.041 ± 0.025	-0.041 ± 0.013
$[Z/H]_{\text{G}}^{\text{BF}}$	-0.138 ± 0.046	-0.133 ± 0.026	-0.172 ± 0.023	-0.255 ± 0.022	-0.253 ± 0.023	-0.196 ± 0.066	-0.213 ± 0.036	-0.256 ± 0.072
$[Z/H]_{\text{NG}}^{\text{BF}}$	-0.159 ± 0.038	-0.176 ± 0.029	-0.126 ± 0.013	-0.182 ± 0.017	-0.162 ± 0.020	-0.236 ± 0.031	-0.140 ± 0.019	-0.221 ± 0.030
$\text{Log}(M_{\text{estelar}}/M_{\odot})_{\text{G}}^{\text{AF}}$	11.13 ± 0.015	11.06 ± 0.019	11.03 ± 0.01	11.00 ± 0.01	10.98 ± 0.02	11.01 ± 0.03	10.99 ± 0.02	10.96 ± 0.03
$\text{Log}(M_{\text{estelar}}/M_{\odot})_{\text{NG}}^{\text{AF}}$	11.11 ± 0.05	11.03 ± 0.03	11.06 ± 0.01	11.00 ± 0.02	10.99 ± 0.01	11.00 ± 0.04	11.01 ± 0.04	11.02 ± 0.04
$\text{Log}(M_{\text{estelar}}/M_{\odot})_{\text{G}}^{\text{BF}}$	10.16 ± 0.08	10.20 ± 0.06	10.07 ± 0.04	10.06 ± 0.02	10.06 ± 0.04	10.15 ± 0.05	9.98 ± 0.06	10.01 ± 0.03
$\text{Log}(M_{\text{estelar}}/M_{\odot})_{\text{NG}}^{\text{BF}}$	10.09 ± 0.09	10.08 ± 0.04	10.11 ± 0.04	10.05 ± 0.016	10.08 ± 0.04	10.08 ± 0.08	10.05 ± 0.04	10.03 ± 0.04

Figura 3.7 - Valores médios de Idade (esquerda),  $[Z/H]$  (meio) e  $M_{\text{estelar}}$  (direita) de galáxias em aglomerados G e NG para cada NZP, separados de acordo com o regime de magnitude.



Nas Figuras 3.8 e 3.9 apresentamos mapas de Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  de galáxias em aglomerados G e NG, geradas a partir de um grid quadrado de  $25 \times 25$ , no espaço  $0 \leq R/R_{200} \leq 1 \times 0 \leq V_{\text{LDV}}/\sigma \leq 3$ . Em cada partição do “grid” calculamos a mediana dos parâmetros de população estelar das galáxias ali contidas. A distribuição resultante é convoluída com um “kernel” gaussiano em 2D, com largura a meia altura de  $\text{FWHM} = 1.88$  pixel. Os pixels que resultam em contagem nula de galáxias são interpolados. Esta interpolação só é realizada quando o pixel nulo é circundado por pelo menos 50% de pixels válidos (ou seja, com contagem diferente de zero).

Tanto no regime de AF quanto de BF, encontramos que aglomerados G apresentam um gradiente em Idade e  $[Z/H]$ , variando de alta Idade e  $[Z/H]$  (cores mais próximas do vermelho) na região central à baixa Idade e  $[Z/H]$  (cores mais próximas do azul) em regiões mais externas. Em  $M_{\text{estelar}}$  notamos um excesso de galáxias de alta  $M_{\text{estelar}}$  na região central e então um contínuo de valores intermediários, o qual chega a uma cor mais azulada em regiões exteriores. No caso NG, notamos um claro excesso de galáxias acima da NZP 8 (acima da última linha sólida) em relação aos aglomerados G. O excesso de galáxias na NZP 8 de aglomerados NG possibilita uma estimativa da taxa da massa estelar acretada em sistemas NG quando comparados ao caso G. Espera-se que a taxa de acreção seja dependente da massa do aglomerado, dado que aglomerados mais massivos são encontrados na confluência de filamentos. Estimamos a taxa de acreção de aglomerados NG de massa do halo superior a  $10^{14.6} M_{\odot}$ , sendo esse limite imposto devido a uma limitação na massa de aglomerados G em nossa amostra. Isso limita nossa estimativa a 43 aglomerados, dos quais 26 são G e 17 são NG. A estimativa da taxa de “infall” em aglomerados NG é

dada por  $\langle M_{\text{estelar,NZP=8}} \rangle / \bar{t}_{\text{inf,NZP=8}}$ , onde  $\langle M_{\text{estelar,NZP=8}} \rangle$  denota a mediana sobre a soma de  $M_{\text{estelar}}$  na NZP 8 e  $\bar{t}_{\text{inf,NZP=8}}$  é o tempo de “infall” médio da NZP 8 (vide Tabela 3.1). Dessa forma, encontramos uma taxa de acreção de aproximadamente  $10^{12} M_{\odot} / \text{Ga}$  a mais em aglomerados NG com  $M_{200} > 10^{14.6} M_{\odot}$ . Vale ressaltar que essa estimativa corresponde à um limite inferior, dado que estamos nos limitando a galáxias dentro de  $R_{200}$ , pois corresponde ao limite até o qual a definição das NZPs é válida.

Figura 3.8 - Mapa de Idade (painéis superiores),  $[Z/H]$  (centrais) e  $M_{\text{estelar}}$  (inferiores) para o EFP de aglomerados G (esquerda) e NG (direita).

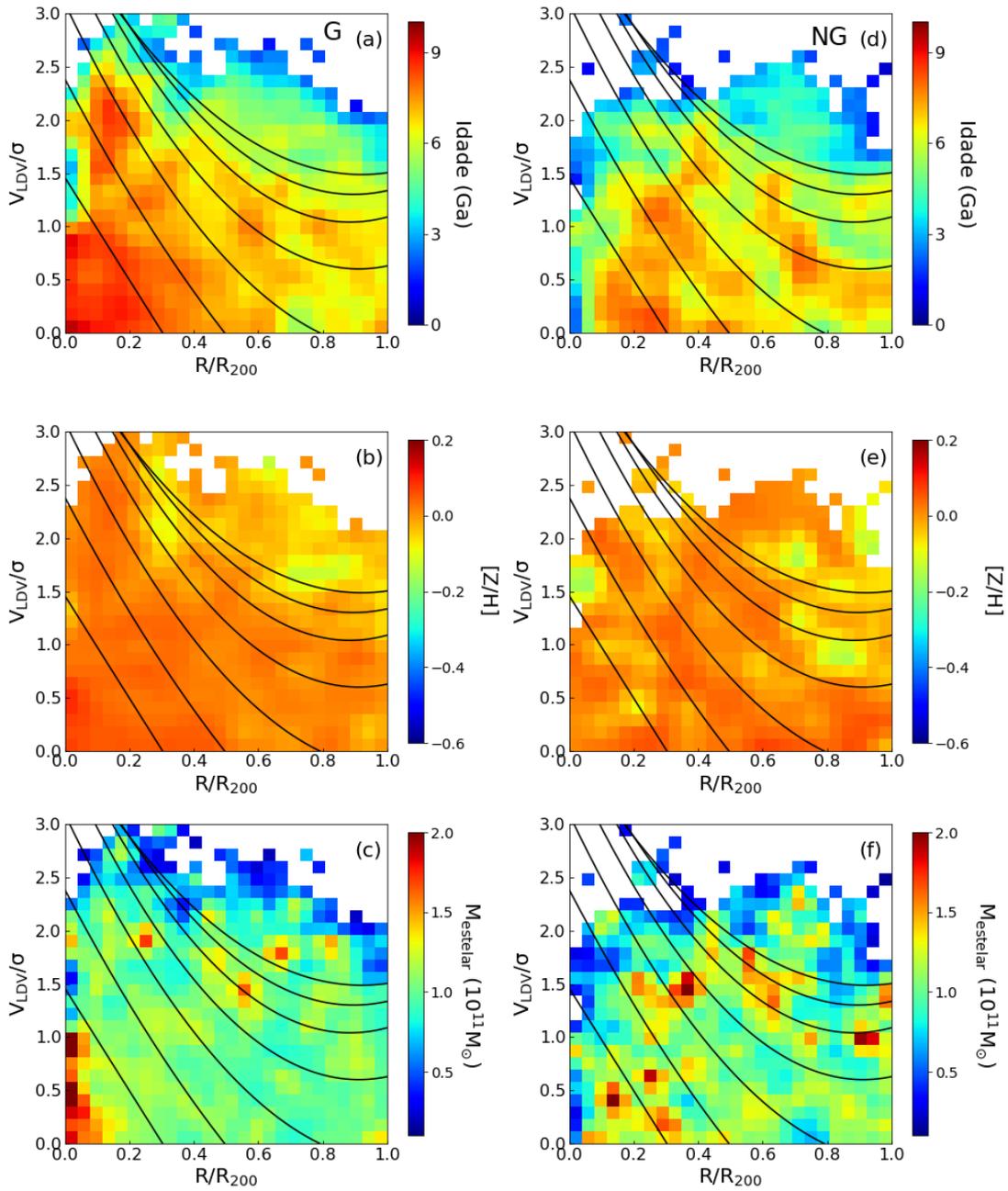
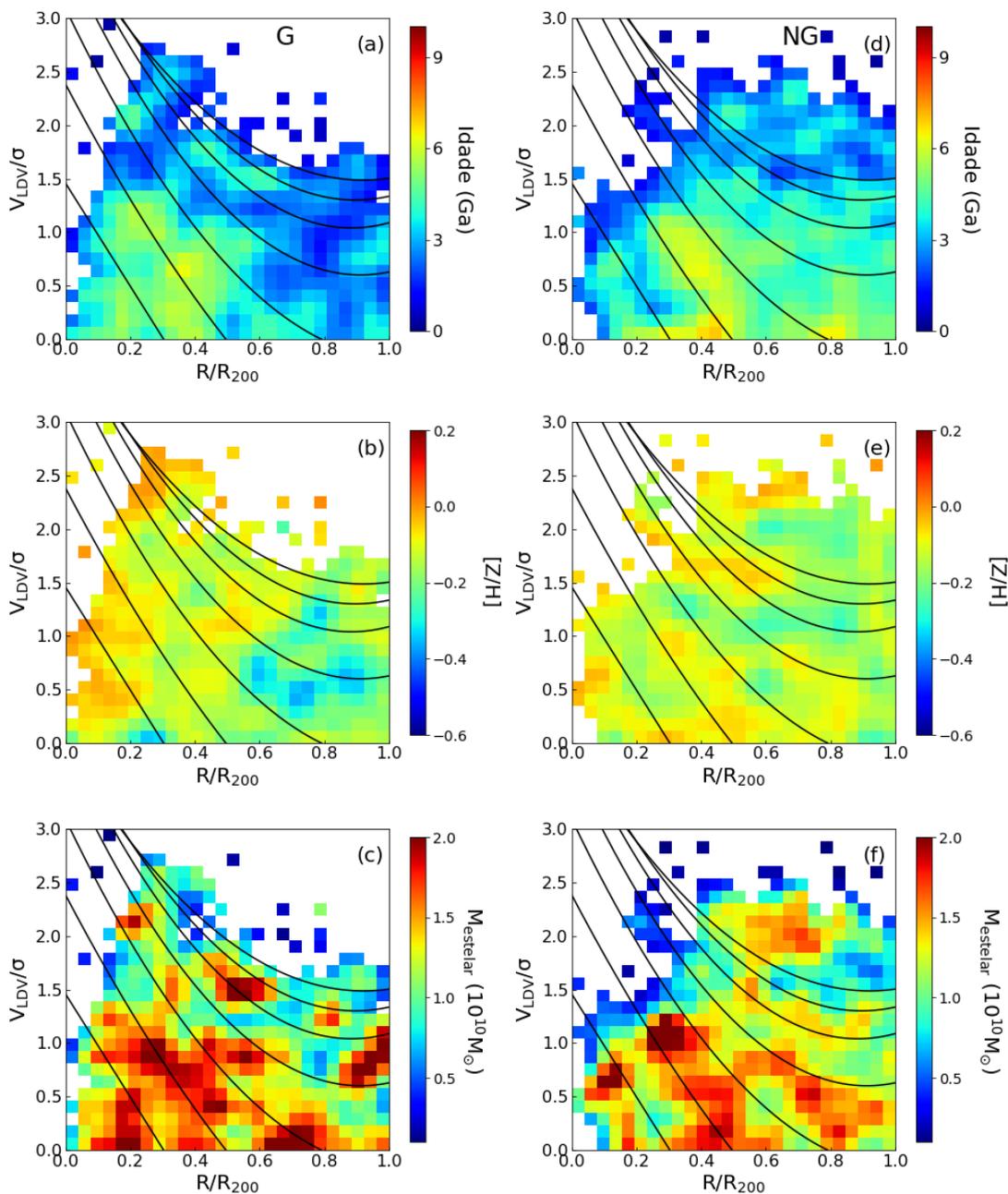


Figura 3.9 - Semelhante à Figura 3.8, mas para o regime de BF. As escalas são mantidas iguais, excetuando  $M_{\text{estelar}}$ , a qual mantivemos o mesmo intervalo, porém em ordem de grandeza diferente.



A análise apresentada até aqui é feita sobre o conjunto de 177 aglomerados, com o centro óptico sendo utilizado na definição do EFP. No entanto, para entender a influência do centro nos resultados aqui apresentados, examinamos de forma similar os 62 aglomerados com centro em raios X. No apêndice F examinamos dois casos

específicos, Yang 005 e Yang 008<sup>5</sup>, quanto às diferenças quando feita a mudança do centro óptico para o centro em raios X. Encontramos que a mudança do centro não causa alterações drásticas tanto na distribuição de galáxias quanto nos parâmetros de população estelar de galáxias ocupando regiões específicas. No entanto, ressaltamos que essa conclusão só é válida para quando feita em conjuntos suficientemente grandes de aglomerados e que em casos de aglomerados únicos a mudança de centro pode afetar os resultados significativamente.

### 3.5 A distância entre os centros óptico e em raios X como medida do estágio dinâmico

A gaussianidade da distribuição de velocidades das galáxias membro tem sido utilizada neste trabalho como critério para separar dois conjuntos de sistemas em estágios dinâmicos diferentes, como em dC17. Nesta seção investigamos como a distância entre os centros óptico e em raios X ( $d_{\text{opt,rx}}$ ) pode estar associada ao estágio dinâmico do aglomerado. A questão que se coloca neste ponto é “como medir o estágio de evolução dinâmica de um aglomerado?”. Assim, consideramos que, por exemplo, aglomerados em processo de coalescência com outros grupos deve ter sua distribuição de matéria bariônica significativamente alterada. No Apêndice G apresentamos dois casos exemplares de aglomerados onde  $d_{\text{opt,rx}}$  parece estar associado ao estágio dinâmico da estrutura como um todo.

#### 3.5.1 Separação dos aglomerados de acordo com $d_{\text{opt,rx}}$

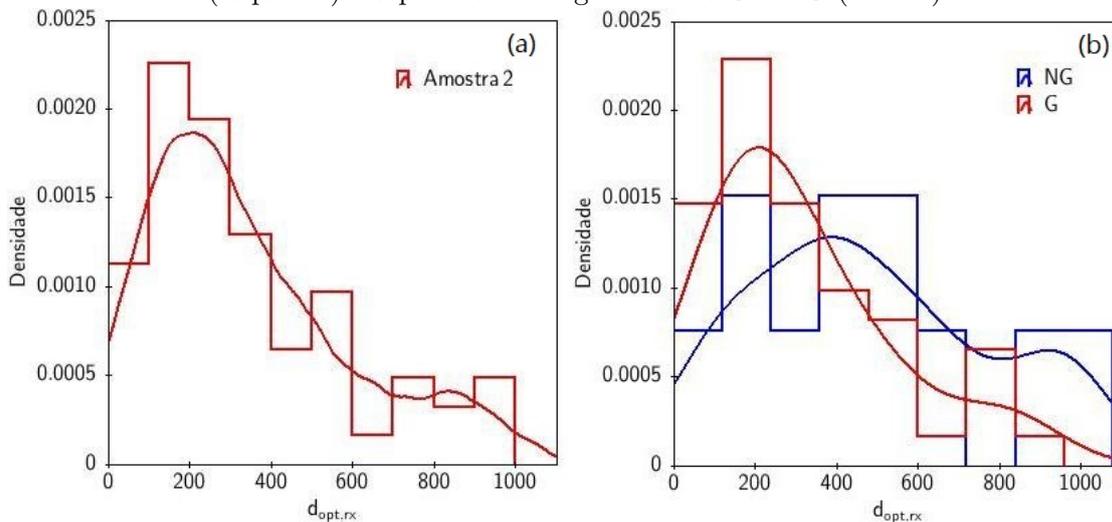
Inicialmente examinamos a distribuição de  $d_{\text{opt,rx}}$  dos 62 aglomerados da Amostra 2, Figura 3.10(a), onde a curva sólida representa a estimativa de densidade por kernel (EDK), na qual adotamos a função de kernel de “epanechnikov”. Da figura notamos a presença de um pico em torno de 200 kpc com um número significativo de sistemas com altos valores de  $d_{\text{opt,rx}}$ . Na Figura 3.10b vê-se que os sistemas classificados como NG são responsáveis pelos altos valores de  $d_{\text{opt,rx}}$ , tendo um pico em  $\sim 400$  kpc.

Utilizamos esse valor como limite conservador para separar dois conjuntos de aglomerados: um com  $d_{\text{opt,rx}} \leq 400$  kpc (aglomerados  $d_{400-}$ ) e outro com  $d_{\text{opt,rx}} > 400$  kpc (aglomerados  $d_{400+}$ ). Dos 62 aglomerados, 21 (15 G e 6 NG) enquadram-se no conjunto  $d_{400+}$  e 41 no  $d_{400-}$  (36 G e 5 NG). O conjunto de aglomerados  $d_{400-}$  são compostos por 2946 galáxias, das quais 825 (28%) são de BF e o conjunto  $d_{400+}$  possui 1733 galáxias, onde 451 (26%) são de BF. Na Figura 3.11 apresentamos as distribuições de Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  de galáxias de AF e BF em aglomerados

---

<sup>5</sup>Estes aglomerados foram escolhidos por serem ilustrativos da influência do centro no EFP.

Figura 3.10 - Histograma da distância entre o centro óptico e de raios X para a Amostra 2 (esquerda) e separando em aglomerados G e NG (direita).



A curva sólida representa uma estimativa de densidade por kernel.

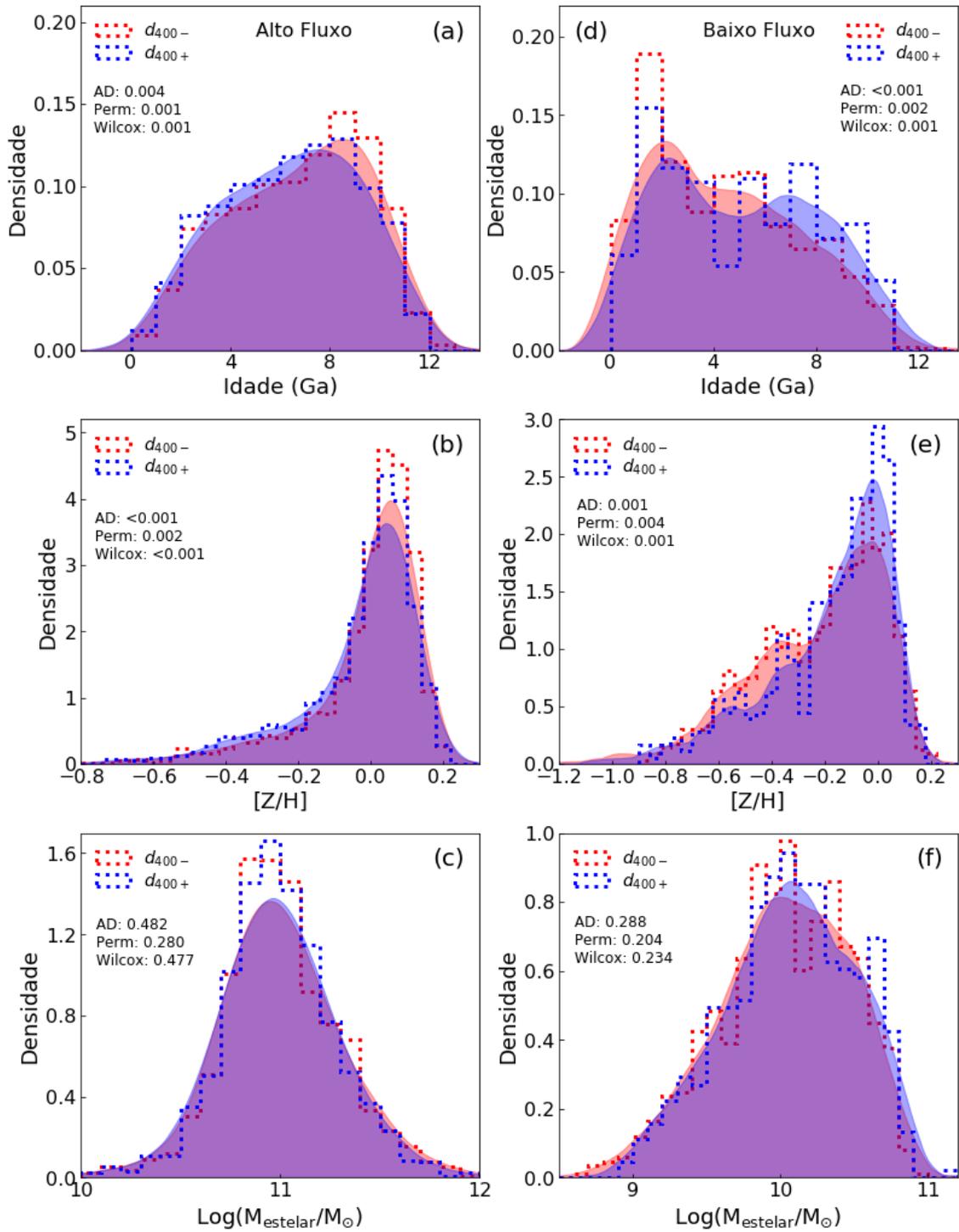
$d_{400-}$  e  $d_{400+}$ . Encontramos diferenças significativas entre distribuições de Idade e  $[Z/H]$  de aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$  tanto no regime AF quanto BF (vide p-values na figura). Não encontramos diferenças estatisticamente significativas nas distribuições de  $M_{estelar}$ , também independente do regime de magnitude considerado. Dentre as principais diferenças mostradas na Figura 3.11, temos:

- em Idade:
  - a) No painel (a) (população de AF) notamos que, para Idades  $< 8$  Ga, existe um excesso de galáxias em sistemas  $d_{400+}$ , enquanto que para Idades  $> 8$  Ga o excesso é em sistemas  $d_{400-}$ , o que faz com que a distribuição de idade para sistemas  $d_{400-}$  pareça deslocada para maiores valores de Idade. A distribuição de Idade no regime AF favorece galáxias mais velhas em aglomerados  $d_{400-}$ ;
  - b) no painel (d), relativo a população de BF, encontramos um excedente de galáxias com Idade  $> 6$  Ga em aglomerados  $d_{400+}$  quando comparado a aglomerados  $d_{400-}$ . No regime BF, a distribuição de Idade favorece galáxias mais velhas em sistemas  $d_{400+}$ ;
  - c) a distribuição de Idade, seja no regime de AF quanto no de BF, apresenta clara bimodalidade. No caso do regime de BF dos sistemas  $d_{400+}$  é ainda mais aparente um pico em  $\sim 2$  Ga e outro em  $\sim 7.5$  Ga;

- em  $[Z/H]$ :
  - a) Assim como observado para a Idade, no regime AF, no painel (b) notamos um excesso de sistemas  $d_{400+}$  para  $[Z/H] < -0.1$ , enquanto que para maiores valores de  $[Z/H]$  dominam os sistemas  $d_{400-}$ . Este comportamento, como foi observado para Idade, mostra que a distribuição de  $[Z/H]$  favorece galáxias mais ricas em metais em sistemas  $d_{400-}$ ;
  - b) no painel (e) encontramos um excesso de galáxias de BF de  $[Z/H] > -0.2$  em aglomerados  $d_{400+}$  relativo a aglomerados  $d_{400-}$ . Aqui observamos que a distribuição de  $[Z/H]$  favorece galáxias mais ricas em metais em sistemas  $d_{400+}$ ;
  - c) no caso da distribuição de  $[Z/H]$ , uma clara bimodalidade é observada no regime de BF, tanto para sistemas  $d_{400+}$  como para  $d_{400-}$ . Os picos aparecem em  $[Z/H] \sim 0.4$  e  $[Z/H] \sim 0.0$ ;

Consideramos a diferença estatística entre as distribuições dos parâmetros de população estelar de galáxias membro em aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$  como mais um indício de que  $d_{\text{opt,rx}}$  também discrimina dois conjuntos de aglomerados em estágios dinâmicos distintos. Investigamos a seguir em mais detalhes essas diferenças por meio da análise do EFP.

Figura 3.11 - Semelhante à Figura 3.3, mas para o caso de aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$ .



### 3.5.2 Regiões de virialização e Infall de aglomerados $d_{400-}$ e $d_{400+}$

De forma análoga à análise feita para aglomerados G e NG, investigamos as diferenças entre os parâmetros de população de galáxias ocupando a região de virialização e “infall” do EFP de aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$ . Na Figura 3.12 apresentamos as comparações dos parâmetros Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  de galáxias de AF nas regiões de virialização e de “infall” (vide p-values na figura). Os principais resultados podem ser sumarizados da seguinte forma:

- a) a distribuição de Idade apresenta diferenças significativas somente na região “virial”, onde notamos um excesso de galáxias com Idades  $> 8$  Ga em aglomerados  $d_{400-}$  em comparação a aglomerados  $d_{400+}$ , enquanto galáxias com Idades  $< 8$  Ga são mais presentes em aglomerados  $d_{400+}$ . A distribuição de Idade na região do virial de sistemas  $d_{400+}$  apresenta clara bimodalidade com picos em  $\sim 4$  Ga e em  $\sim 9$  Ga;
- b) o parâmetro  $[Z/H]$  apresenta distribuição distinta tanto na região do virial quanto na de “infall”. Aglomerados  $d_{400-}$  possuem um excesso de galáxias com  $[Z/H] > 0.0$  em relação aos sistemas  $d_{400+}$  tanto na região de virial como na de “infall”. Nas duas regiões os sistemas  $d_{400+}$  apresentam clara bimodalidade;
- c)  $M_{\text{estelar}}$  apresenta distribuições equivalentes tanto na região de “infall” quanto na região “virial”;

Na Figura 3.13 apresentamos as mesmas comparações, mas para o regime BF de luminosidade. Nesse caso encontramos que as distribuições dos parâmetros  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  são estatisticamente equivalentes tanto na região “virial” quanto na de “infall”. No entanto, devemos notar que sistemas  $d_{400-}$  apresentam distribuição bimodal em ambos os ambientes enquanto sistemas  $d_{400+}$  apresentam distribuição bimodal somente na região de “infall”. Já o parâmetro Idade apresenta distribuições estatisticamente distintas em aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$ , em ambas as regiões. Dentre as principais diferenças, podemos citar: 1) No painel (a) notamos um excesso de galáxias com Idade  $< 6$  Ga na região de virialização de aglomerados  $d_{400-}$  e um excesso de galáxias com Idade  $> 8$  Ga em aglomerados  $d_{400+}$ ; e 2) no painel (d), relacionado à “infall”, encontramos um pequeno excesso de galáxias com Idade  $< 6$  Ga em aglomerados  $d_{400-}$ . No entanto, o que é claro desta figura é a bimodalidade presente em ambos os tipos de aglomerados.

Figura 3.12 - Semelhante à Figura 3.12, mas para aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$ .

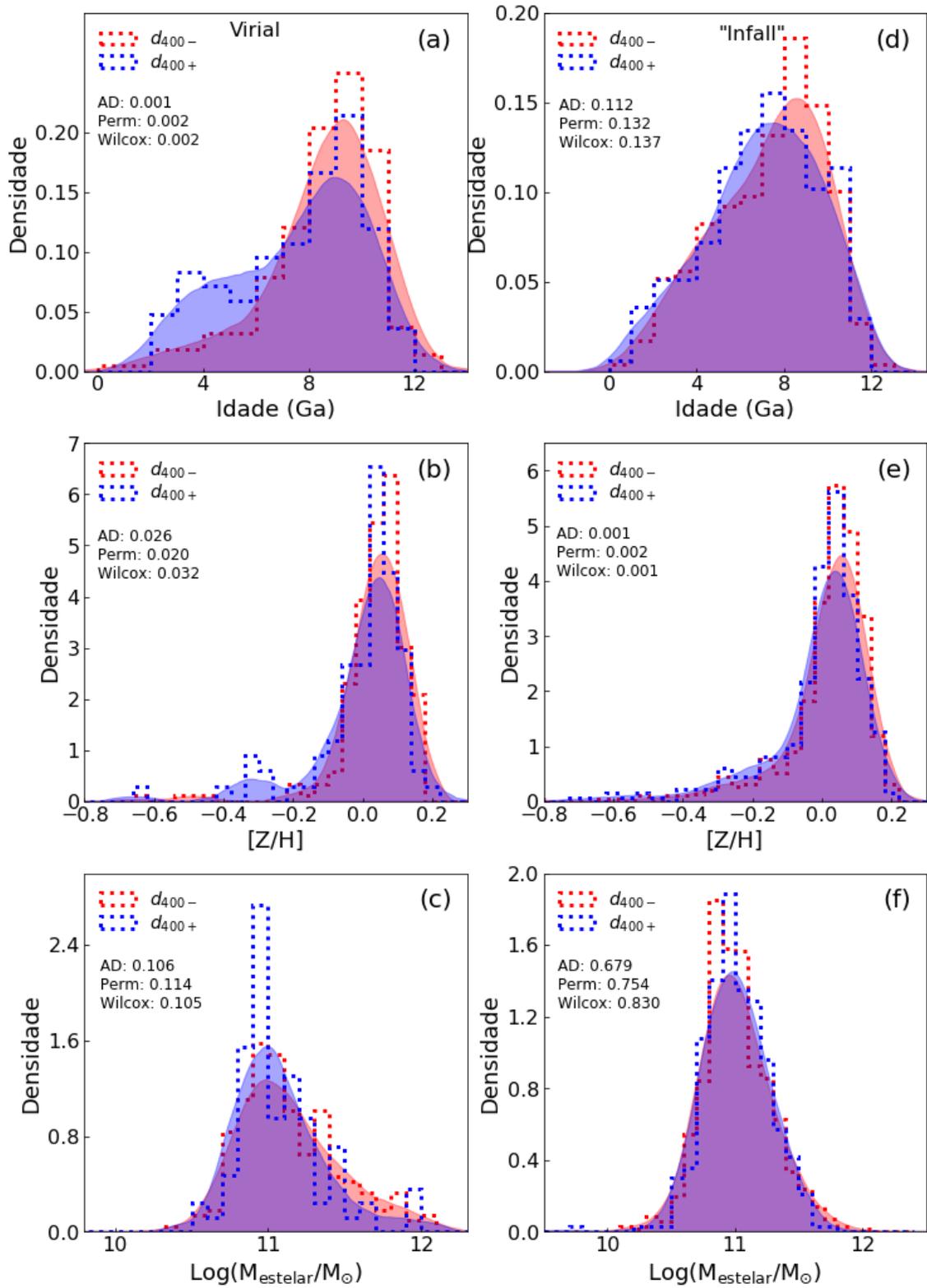
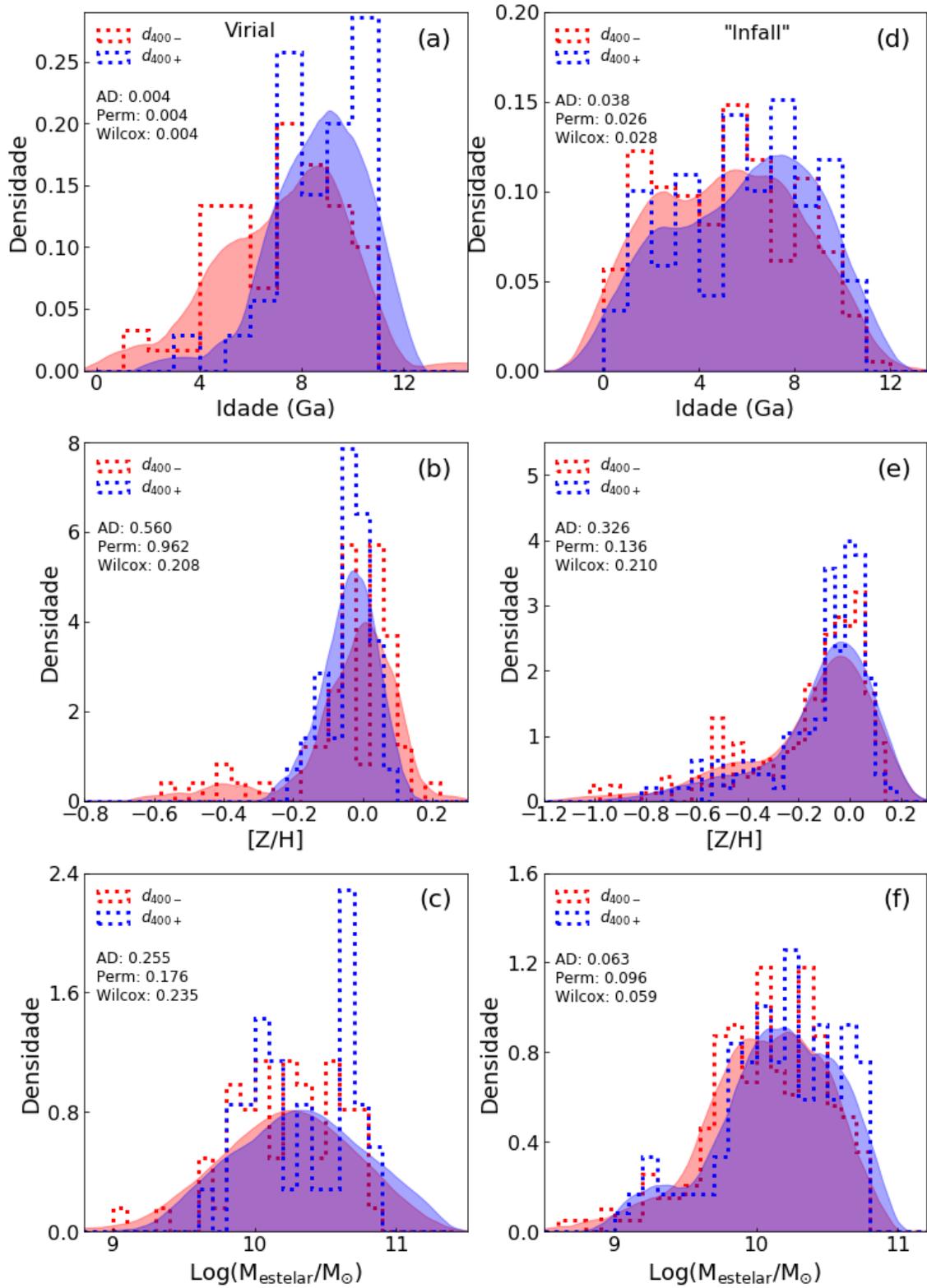


Figura 3.13 - Semelhante à figura 3.12, mas para galáxias de BF.



### 3.5.3 Regiões específicas do EFP de aglomerados com diferentes $d_{\text{opt,rx}}$

Nesta seção investigamos em detalhes cada uma das regiões do EFP de aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$ . Apresentamos com maior especificidade os resultados provenientes da divisão do EFP em NZPs, por ser esta divisão a que melhor se adequa a distribuição do tempo de “infall” das galáxias contidas em cada região. Na Tabela 3.5 apresentamos os valores de Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  para cada região do EFP, separadas de acordo com o regime de luminosidade e classe do aglomerado.

Da Tabela 3.5 notamos diferenças significativas entre os parâmetros de população estelar. No regime de AF, encontramos que a Idade das galáxias em aglomerados  $d_{400-}$  é em média  $\sim 0.4$  Ga maior do que nos sistemas  $d_{400+}$ , sendo que nas regiões internas, de maior  $t_{\text{inf}}$ , esta diferença em Idade chega a  $\sim 1$  Ga. Notamos também um gradiente no parâmetros Idade, o qual apresenta uma variação de  $\Delta\text{Idade} = 2.85$  Ga para aglomerados  $d_{400-}$  e  $1.34$  Ga para aglomerados  $d_{400+}$  entre as NZPs 1 e 8. O parâmetro  $[Z/H]$  apresenta comportamento semelhante, sendo sistematicamente maior ( $\sim 0.039$  dex, em média) para galáxias em aglomerados  $d_{400-}$  em comparação a sistemas  $d_{400+}$ .

Examinando o regime de BF encontramos diferenças significativas entre aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$ . A ressaltar:

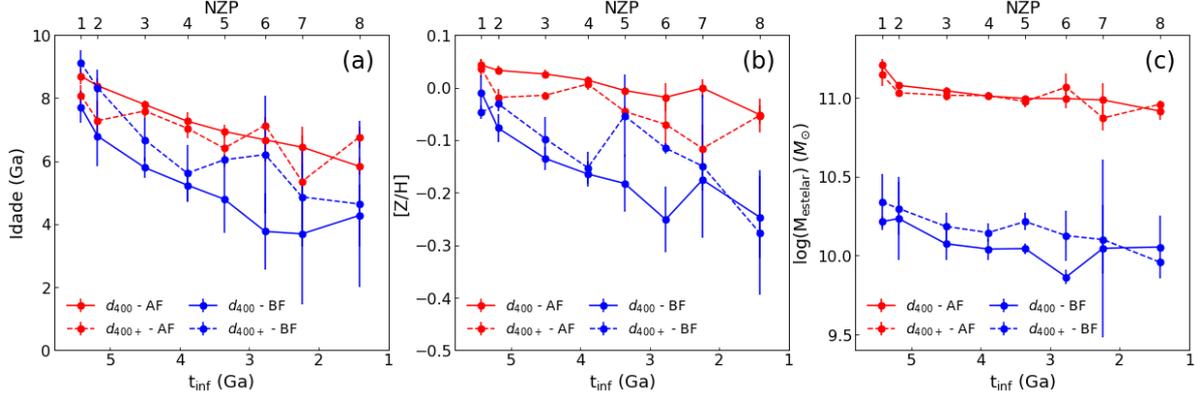
- a) galáxias de BF em aglomerados  $d_{400+}$  são em média  $1.17$  Ga mais velhas do que em aglomerados  $d_{400-}$ . A maior diferença encontra-se nas regiões 5, 6 e 7, nas quais a diferença média eleva-se a  $1.62$  Ga (vide Figura 3.14);
- b) notamos um gradiente em Idade de  $\Delta\text{Idade} = 3.35$  Ga em aglomerados  $d_{400-}$  e  $\Delta\text{Idade} = 4.48$  Ga em aglomerados  $d_{400+}$ . A diferença entre os gradientes mostra que galáxias em aglomerados  $d_{400+}$  possuem Idades menores para maiores  $t_{\text{inf}}$ ;
- c) O parâmetro  $[Z/H]$  apresenta comportamento semelhante à Idade. Aglomerados  $d_{400+}$  possuem galáxias de BF mais enriquecidas em metais em praticamente todas as NZPs com relação a aglomerados  $d_{400-}$ , sendo a diferença média de  $0.040$  dex. Notamos também que a maior diferença encontra-se nas NZPs 5 e 6, nas quais a diferença média é de  $0.133$  dex.
- d) Assim como em Idade, também notamos que entre as NZPs 1 e 8 existe um gradiente em  $[Z/H]$ , o qual apresenta variação de  $\Delta[Z/H] = 0.238$  em aglomerados  $d_{400-}$  e  $\Delta[Z/H] = 0.228$  em sistemas  $d_{400+}$ ;

- e) galáxias de BF em aglomerados  $d_{400+}$  possuem  $M_{\text{estelar}}$  em média 0.10 dex maior do que em aglomerados  $d_{400-}$ . Assim como no caso de Idade e  $[Z/H]$ , as maiores diferenças acontecem nas NZPs 5 e 6 onde a diferença média é aumentada para 0.22 dex. No entanto, diferentemente de Idade e Metalicidade, não encontramos um gradiente significativo em  $M_{\text{estelar}}$ , mantendo-se praticamente constante em todas as NZPs.
- f) reforçamos que as maiores diferenças em Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  acontecem em NZPs semelhantes ( $\sim 4$  e  $7$ ), relacionadas a galáxias recém acregadas ao sistema, com  $t_{\text{inf}} \sim 3$  Ga;

Tabela 3.5 - Semelhante a Tabela 3.3, mas para a divisão do EFP por meio de NZPs.

NZP	1	2	3	4	5	6	7	8
Idade <sub>d400-</sub> <sup>AF</sup> (Ga)	8.69 ± 0.24	8.39 ± 0.24	7.79 ± 0.13	7.26 ± 0.29	6.94 ± 0.21	6.67 ± 0.69	6.44 ± 0.65	5.84 ± 0.28
Idade <sub>d400+</sub> <sup>AF</sup> (Ga)	8.09 ± 0.31	7.28 ± 0.63	7.59 ± 0.22	7.04 ± 0.33	6.40 ± 0.61	7.13 ± 0.26	5.35 ± 1.46	6.75 ± 0.35
Idade <sub>d400-</sub> <sup>BF</sup> (Ga)	7.72 ± 0.52	6.79 ± 0.95	5.79 ± 0.33	5.23 ± 0.50	4.79 ± 1.06	3.77 ± 1.21	3.69 ± 2.25	4.27 ± 0.98
Idade <sub>d400+</sub> <sup>BF</sup> (Ga)	9.12 ± 0.41	8.32 ± 0.58	6.67 ± 0.69	5.61 ± 0.91	6.04 ± 0.17	6.21 ± 1.88	4.86 ± 1.58	4.64 ± 2.63
[Z/H] <sub>d400-</sub> <sup>AF</sup>	0.043 ± 0.012	0.033 ± 0.008	0.026 ± 0.008	0.014 ± 0.006	-0.006 ± 0.006	-0.019 ± 0.027	-0.001 ± 0.017	-0.052 ± 0.017
[Z/H] <sub>d400+</sub> <sup>AF</sup>	0.037 ± 0.018	-0.019 ± 0.016	-0.015 ± 0.006	0.007 ± 0.010	-0.046 ± 0.011	-0.070 ± 0.045	-0.116 ± 0.0451	-0.053 ± 0.032
[Z/H] <sub>d400-</sub> <sup>BF</sup>	-0.009 ± 0.032	-0.077 ± 0.027	-0.135 ± 0.022	-0.165 ± 0.024	-0.183 ± 0.054	-0.251 ± 0.063	-0.176 ± 0.020	-0.247 ± 0.078
[Z/H] <sub>d400+</sub> <sup>BF</sup>	-0.048 ± 0.013	-0.031 ± 0.014	-0.098 ± 0.041	-0.153 ± 0.030	-0.054 ± 0.078	-0.116 ± 0.010	-0.150 ± 0.136	-0.276 ± 0.118
Log(M <sub>estelar</sub> /M <sub>☉</sub> ) <sub>d400-</sub> <sup>AF</sup>	11.21 ± 0.04	11.08 ± 0.02	11.05 ± 0.02	11.01 ± 0.02	11.00 ± 0.01	11.00 ± 0.06	10.99 ± 0.10	10.92 ± 0.06
Log(M <sub>estelar</sub> /M <sub>☉</sub> ) <sub>d400+</sub> <sup>AF</sup>	11.15 ± 0.07	11.03 ± 0.02	11.02 ± 0.03	11.02 ± 0.02	10.98 ± 0.03	11.07 ± 0.09	10.87 ± 0.08	10.96 ± 0.03
Log(M <sub>estelar</sub> /M <sub>☉</sub> ) <sub>d400-</sub> <sup>BF</sup>	10.22 ± 0.03	10.24 ± 0.26	10.08 ± 0.10	10.04 ± 0.07	10.04 ± 0.03	9.86 ± 0.05	10.05 ± 0.56	10.05 ± 0.20
Log(M <sub>estelar</sub> /M <sub>☉</sub> ) <sub>d400+</sub> <sup>BF</sup>	10.34 ± 0.18	10.30 ± 0.17	10.19 ± 0.09	10.15 ± 0.06	10.22 ± 0.05	10.13 ± 0.16	10.10 ± 0.22	9.96 ± 0.03

Figura 3.14 - Semelhante à Figura 3.7, mas para aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$



### 3.6 Discussão: o que essas tendências significam fisicamente?

Galáxias têm sua evolução fortemente influenciada pelo ambiente no qual se encontram. A relação densidade-morfologia mostra que galáxias “early-type” são encontradas em maior proporção em ambientes de alta densidade, enquanto galáxias “late-type” dominam ambientes de baixa densidade (DRESSLER, 1980). O balanço entre efeitos internos e externos na evolução de galáxias dá origem ao debate conhecido como “nature vs nurture”. O estudo de aglomerados de galáxias é de suma importância para entender efeitos ambientais em galáxias. Aglomerados de galáxias cobrem um amplo domínio de densidade galáctica (sete ordens de magnitude, aproximadamente), desde as regiões centrais até sua periferia. Isto nos permite utilizar estes sistemas para estudar os efeitos de pressão de arraste (ABADI et al., 1999) e efeitos de maré quando galáxias e/ou grupos são acretados ao aglomerados (RHEE et al., 2017).

De maneira simplificada, aglomerados podem ter seu estágio dinâmico alterado quando galáxias e/ou grupos são acretadas no mesmo. A importância de acreções no estágio dinâmico de aglomerados tem sido estudada extensivamente nas últimas décadas (GENEL et al., 2009; ROBERTS; PARKER, 2017; CARVALHO et al., 2017; RIBEIRO et al., 2013). Esses sistemas podem ser modelados como uma componente virializada, constituída em sua maioria de galáxias dominadas por populações estelares velhas, e uma segunda componente, em quasi-equilíbrio, composta por galáxias dominadas por uma população estelar jovem (CARLBERG et al., 1997; ELLINGSON et al., 2001). Além disso, a componente em quasi-equilíbrio resulta possivelmente de acreções provenientes de filamentos (dC17). É importante ressaltar que os filamentos, embora sejam ambientes de baixa densidade, contêm galáxias e grupos que apre-

sentam evolução de sua população estelar mesmo antes de entrarem no aglomerado. Neste trabalho investigamos a correlação entre os parâmetros de população estelar de galáxias e o estágio dinâmico do aglomerado no qual estas galáxias se encontram. Caracterizamos o estágio dinâmico dos aglomerados por meio da gaussianidade da distribuição de velocidades projetada de galáxias membro e através da distância entre os centros óptico e em raios X.

Neste estudo utilizamos a amostra descrita em dC17, composta por 143 aglomerados classificados como G e 43 como NG. Os parâmetros de população estelar Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  foram estimados a partir de um ajuste espectral, o qual fornece estimativas em concordância com aquelas disponíveis no banco de dados do levantamento SDSS-DR12. As galáxias membro dos aglomerados são divididas em dois regimes de luminosidade (AF e BF), de forma a garantir a mesma amostragem da função de luminosidade em todos os sistemas.

Um dos objetivos principais deste projeto é estabelecer relações unívocas entre o estágio dinâmico de aglomerados massivos e o conteúdo estelar de suas galáxias membro. É evidente se esperar que as regiões externas sejam aquelas onde efeitos de maré se manifestem mais claramente na medida que galáxias e/ou grupos do campo local em torno do aglomerado ou de filamentos sejam acretados. Lembremos que a amostra aqui estudada é de aglomerados com massas acima de  $10^{14}M_{\odot}$ . Assim, o primeiro importante teste realizado foi comparar regiões externas de aglomerados ( $1 < R/R_{200} < 3$ , vide região A na Figura 3.1) de sistemas G e NG. O fato de encontrarmos um percentual significativamente maior de galáxias na região A de sistemas NG em relação aos G (42% vs 27% para o regime AF e 46% vs 29% para o regime BF) indica uma maior taxa de “infall” desses, em acordo com recentes trabalhos (CARVALHO et al., 2017; ROBERTS; PARKER, 2017).

Quando examinamos as distribuições de Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  de sistemas G e NG, discriminando as galáxias membro somente de acordo com o regime de luminosidade, encontramos que as maiores diferenças encontram-se no regime de BF, embora as distribuições de Idade em aglomerados G e NG também pareçam ser distintas no regime de AF, como atestado pelos valores de p-value. Tais diferenças são um indício de que a gaussianidade da distribuição de velocidades de fato define duas famílias de sistemas, possivelmente em estágios dinâmicos distintos, como argumentado em Ribeiro et al. (2013). Além disso, é importante lembrar que da relação morfologia-densidade (MD), espera-se que acreções provenientes de filamentos e regiões de baixa densidade sejam em sua maioria de galáxias “late type”. No entanto, esse processo

pode ser mais complexo do que o indicado pela relação MD. Em suma, a simples análise dos dois regimes de luminosidade em sistemas G e NG não são suficientes para estabelecer de forma robusta como estas famílias se caracterizam.

Uma comparação entre os parâmetros de população estelar de galáxias de AF ocupando as regiões do virial e de “infall” do EFP de aglomerados G e NG mostra que não há diferenças significativas, exceto para a distribuição de  $[Z/H]$ , na região de “infall” (Vide Figura 3.4e). Esta diferença pode ser interpretada como um primeiro indício de que galáxias sendo acretadas em sistemas NG possuem uma história de formação estelar distinta daquela da periferia de sistemas G. É importante também mencionar que a ausência de diferenças significativas em quase todos os parâmetros de população estelar no regime de AF pode indicar que galáxias mais massivas são menos afetadas por efeitos como pressão de arraste (ROBERTS et al., 2019) e perda de massa por efeitos de maré (RHEE et al., 2017). No entanto, o quadro geral é bem diferente no regime de BF. Neste regime de luminosidade começamos a identificar diferenças relevantes em Idade entre as regiões de virial e “infall” de sistemas G e NG. A bimodalidade em Idade, tanto no virial como em “infall”, é característica de ambos os ambientes, no entanto, em sistemas NG encontramos um excesso de galáxias de baixa Idade que corroboram a idéia de, não só de uma maior taxa de “infall” nas periferias de sistemas NG, mas também que tais sistemas apresentam episódios de formação estelar mais recente, provavelmente induzidos por efeitos de maré na medida em que estas galáxias de baixa massa são acretadas ao sistema. Este cenário está em acordo com os resultados obtidos por dC17 e Roberts e Parker (2017). As diferenças em  $[Z/H]$  mostram um excesso de sistemas com metalicidade solar exatamente na região de “infall” de sistemas NG dando maior suporte à ideia de que estas galáxias já vinham sendo “pré-processadas” antes mesmo de serem acretadas aos aglomerados (ROBERTS; PARKER, 2017). Finalmente, a diferença manifesta em  $M_{\text{estelar}}$  na região do virial expressa basicamente a segregação em luminosidade (CAPELATO et al., 1980), com uma bimodalidade para os sistemas G que não está claramente presente nos aglomerados NG (Vide Figura 3.5c). Embora esta análise ainda não explore toda a informação presente no EFP, já identificamos algumas relações que evidentemente associam o estágio dinâmico de aglomerados com as populações estelares de suas galáxias membro.

O impacto de mecanismos de remoção de gás das galáxias, na medida em que estas são acretadas aos aglomerados, dependem diretamente do tempo de “infall”. Galáxias recém acretadas, provenientes de ambientes de baixa densidade, ainda manifestam propriedades associadas à localização onde se desenvolviam antes de serem

acretadas. Como apontado por [Paccagnella et al. \(2016\)](#), a escala de tempo necessária para o processo de TFE torna-se um parâmetro importante para entender o efeito do ambiente em galáxias. [Roberts et al. \(2019\)](#) indicam que o processo de truncamento de formação estelar em galáxias movendo-se em aglomerados acontece somente quando a densidade do MIA é superior a um limite acima do qual a escala de tempo de remoção do gás das galáxias por pressão de arraste é da ordem de 3 Ga. A dependência dos efeitos do MIA com  $t_{\text{inf}}$  sugerem a existência de um gradiente nos parâmetros de população estelar com a distância ao centro do aglomerado. O fato de encontrarmos que aglomerados NG apresentam gradientes em Idade e  $[Z/H]$  menores do que os observado em sistemas G, tanto em AF quanto em BF é uma indicação do cenário onde o tempo de “infall” determina o conteúdo estelar das galáxias recém acretadas. Este resultado está de acordo com [Roberts e Parker \(2019\)](#), o qual mostra que aglomerados NG passaram por sua última grande fusão mais recentemente do que sistemas G. Grandes fusões acabam por perturbar a região do virial de aglomerados e introduzem galáxias de baixa Idade e  $[Z/H]$  nesta região, usualmente caracterizada por galáxias com uma população estelar velha e de alto  $[Z/H]$ . Finalmente, aglomerados NG apresentam galáxias de  $t_{\text{inf}} < 4.5$  Ga com Idade e  $[Z/H]$  superiores a sua contraparte em sistemas G, tanto no regime de AF quanto de BF. [Pasquali et al. \(2019\)](#) mostram que galáxias de maior Idade e  $[Z/H]$  em regiões de baixa densidade (ou seja, menor  $t_{\text{inf}}$ ) possivelmente foram pré-processadas. Portanto, os resultados descritos apontam para uma maior presença de galáxias pré-processadas em sistemas NG em comparação ao caso G. Complementar a diferença nos parâmetros de população estelar, [Carvalho et al. \(2019\)](#) mostra que o efeito do ambiente em galáxias depende de sua morfologia, sendo mais evidente em galáxias espirais de BF. Além disso, [Costa et al. \(2018\)](#) mostra que diferenças no perfil de dispersão de velocidade de galáxias em aglomerados G e NG sugerem uma maior separação entre galáxias de BF e AF em aglomerados G, quando comparados a sistemas NG. Em suma, estes resultados apontam para uma maior taxa de “infall” de galáxias pré-processadas em aglomerados NG.

Parte essencial da análise de sistemas dinâmicos consiste na definição do centro do mesmo. Em geral o centro de um aglomerado é dado pela média das coordenadas (AR e DEC) ponderadas pela luminosidade de cada galáxia. No entanto, essa estimativa pode não representar bem o centro dinâmico do sistema, pois galáxias são responsáveis por somente 1% da massa total do aglomerado. Dessa forma, acreções em aglomerados podem causar variações no centro óptico que não correspondem à real variação no centro dinâmico do sistema. Uma forma mais robusta de definir o centro de um aglomerado vem de observações em raios X, as quais possibilitam uma

caracterização do gás no MIA, responsável por 10% da massa do sistema. Neste trabalho utilizamos duas estimativas de centro para os aglomerados,  $c_{\text{opt}}$  e  $c_{\text{rx}}$ . Espera-se que a distância entre as duas estimativas esteja diretamente relacionada com o histórico de acreção do aglomerado, possibilitando uma caracterização do estágio dinâmico de aglomerados por meio da distância entre  $c_{\text{opt}}$  e  $c_{\text{rx}}$ ,  $d_{\text{opt,rx}}$ . Aglomerados de maior  $d_{\text{opt,rx}}$  possivelmente encontram-se em estágios dinâmicos mais afastados do equilíbrio quando comparados a sistemas que apresentam menor  $d_{\text{opt,rx}}$ . Quando discretizada em aglomerados G e NG, a distribuição de  $d_{\text{opt,rx}}$  apresenta diferenças significativas entre as duas classes, o que reforça a validade da caracterização do estágio dinâmico por meio da gaussianidade da distribuição de velocidade. Além disso, é importante ressaltar o excesso de aglomerados com  $d_{\text{opt,rx}} > 400$  kpc (vide Figura 3.10), o que está de acordo com a hipótese de que sistemas NG encontram-se mais afastados do equilíbrio dinâmico do que sistemas G.

A separação das populações galácticas de aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$  de acordo com o tempo de “infall” mostra que  $d_{\text{opt,rx}}$  define dois conjuntos com diferenças melhor estabelecidas do que no caso G vs NG. Tanto em AF quanto em BF a relação entre os parâmetros de população estelar de galáxias em  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$  permanece inalterada, independente do tempo de “infall”. A Idade e  $[Z/H]$  de galáxias de AF em aglomerados  $d_{400-}$  são, em média, maior do que sua contraparte em sistemas  $d_{400+}$  e apresentam máxima diferença em regiões de  $t_{\text{inf}} > 4.5$  Ga. Como mencionado anteriormente, grandes fusões perturbam a região do virial do sistema, introduzindo galáxias de baixa Idade no mesmo. Portanto, este resultado está de acordo com a hipótese de que aglomerados  $d_{400+}$  sofreram sua última grande fusão mais recentemente que sistemas  $d_{400-}$ , de forma análoga ao que foi encontrado no caso G vs NG (ROBERTS; PARKER, 2019). Diferentemente do caso AF, no regime de BF galáxias em aglomerados  $d_{400+}$  que apresentam maior Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  do que sua contraparte em sistemas  $d_{400-}$ . É importante ressaltar que as maiores diferenças acontecem em regiões relacionadas a galáxias recém acretadas, provenientes de ambientes de baixa densidade. Portanto, estes resultados sugerem uma maior taxa de “infall” de galáxias pré-processadas em sistemas  $d_{400+}$  (PASQUALI et al., 2019). É importante ressaltar que no caso da divisão por meio de  $d_{\text{opt,rx}}$  ambas as classes apresentam gradientes semelhantes em Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$ , ao contrário do que foi observado no caso G vs NG. Isto indica que as diferenças entre os parâmetros Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  de aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$  podem ser bem descritas por um simples “offset”. No entanto, vale lembrar que a presença de um gradiente em ambas as classes indica um cenário no qual  $t_{\text{inf}}$  determina os parâmetros de população estelar das galáxias acretadas de forma distinta para sistemas  $d_{400+}$  e  $d_{400-}$ .

Brevemente, esses resultados sugerem que a divisão por meio de  $d_{\text{opt,rx}}$  define dois conjuntos de aglomerados que de fato apresentam-se em estágios dinâmicos distintos e, além disso, possuem diferenças entre si mais significativas do que foi constatado no caso G vs NG. A maior diferença entre aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$  reforça a importância de uma análise considerando as diferentes componentes de aglomerados (gás, galáxias e matéria escura) em uma análise do equilíbrio dinâmico dos mesmos.

Neste trabalho investigamos a utilização da gaussianidade da distribuição de velocidades e de  $d_{\text{opt,rx}}$  como parâmetros para separar dois conjuntos de aglomerados em estágios dinâmicos distintos. Relacionamos também o estágio dinâmico dos sistemas com o histórico de formação estelar das galáxias membro. Nossos resultados indicam que tanto a gaussianidade da distribuição de velocidades de galáxias membro quanto a distância entre o centro óptico e em raios X definem de fato dois conjuntos de aglomerados em estágios dinâmicos distintos. Simulações de N-corpos mostram que aglomerados de maior massa apresentam uma maior taxa de fusão (GENEL et al., 2009). Nossa amostra é constituída somente por aglomerados massivos ( $M > 10^{14}M_{\odot}$ ) e portanto é provável que uma fração considerável deles já tenha sofrido uma grande fusão. Roberts e Parker (2019) sugere que aglomerados fora do equilíbrio dinâmico sofreram sua última grande fusão mais recentemente. Dessa forma, os resultados encontrados para aglomerados NG e  $d_{400+}$  indicam que essas duas classes representam aglomerados afastados do equilíbrio dinâmico, quando comparados a sistemas G e  $d_{400-}$ . Além disso, os mapas de Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  no EFP indicam que o tempo de “infall” é o parâmetro que determina a história de formação estelar da galáxia sendo acretaada. O efeito é mais pronunciado em sistemas NG, confirmando resultados anteriores de uma maior taxa de “infall” para sistemas NG. A estimativa da taxa de “infall” de  $\sim 10^{12}M_{\odot}/\text{Ga}$  em aglomerados NG massivos deverá ser confrontada com estudos realizados com simulações cosmológicas como ILLUSTRIS, tema a ser abordado no desenvolvimento posterior deste trabalho.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRÓXIMAS ETAPAS

Neste trabalho apresentamos uma análise de como o estágio dinâmico de aglomerados de galáxias alteram as propriedades das galáxias membro. O estágio dinâmico do aglomerado foi definido de forma binária entre Gaussiano ou Não-Gaussiano, de acordo com a distribuição de velocidade. Expandimos essa análise utilizando o EFP. Utilizamos resultados prévios de simulações (RHEE et al., 2017; PASQUALI et al., 2019) para delimitar diferentes regiões no EFP, de forma a separar galáxias em diferentes estágios dinâmicos dentro do aglomerado. Analisamos os parâmetros de população estelar Idade,  $[Z/H]$  e  $M_{\text{estelar}}$  para cada uma dessas regiões, encontrando diferenças significativas para aglomerados G e NG. Apresentamos também uma divisão dos aglomerados de acordo com a distância entre o centro óptico e o centro em raios X, que demonstrou ser eficiente em distinguir dois conjuntos de aglomerados em estágios dinâmicos distintos. Os resultados e conclusões são apresentados de forma esquemáticas nas Figuras 4.1 (G vs NG) e 4.2 (análise de acordo com  $d_{\text{opt,rx}}$ ).

Figura 4.1 - Mapa esquemático dos principais resultados e conclusões quanto a comparação entre aglomerados G e NG.

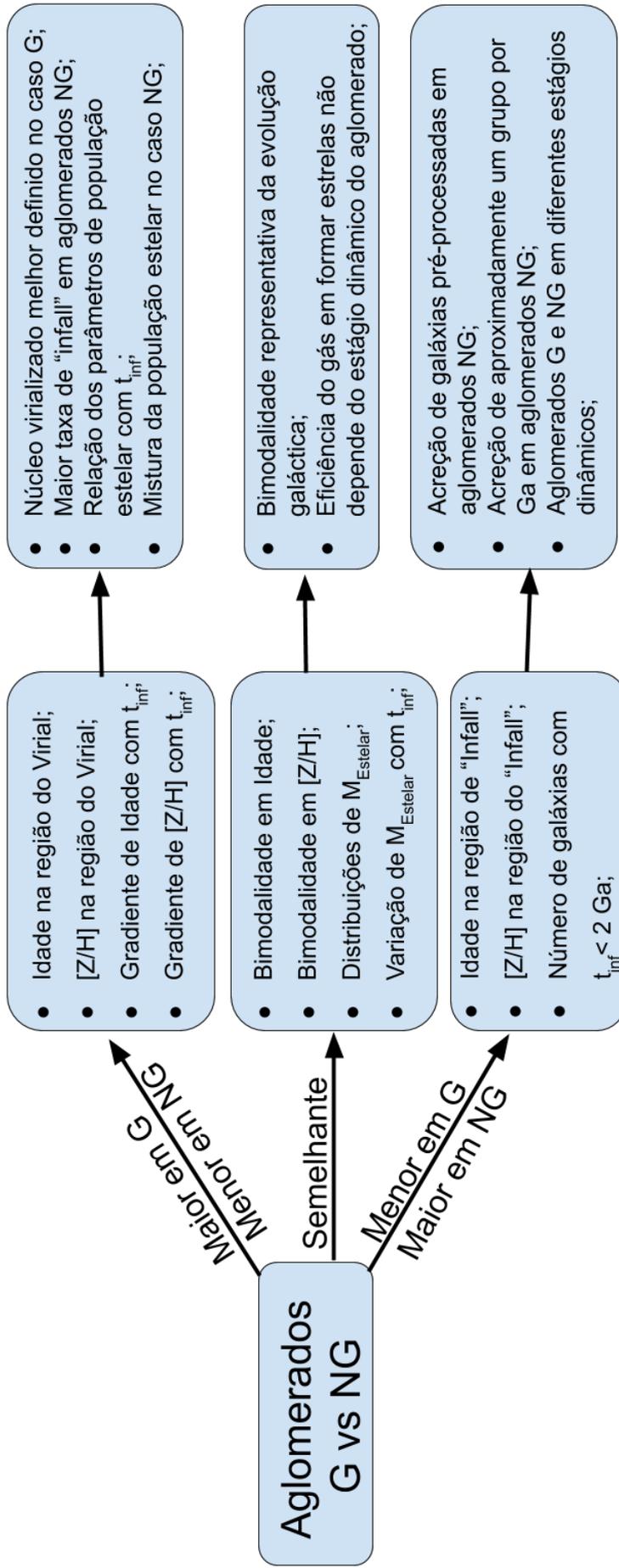
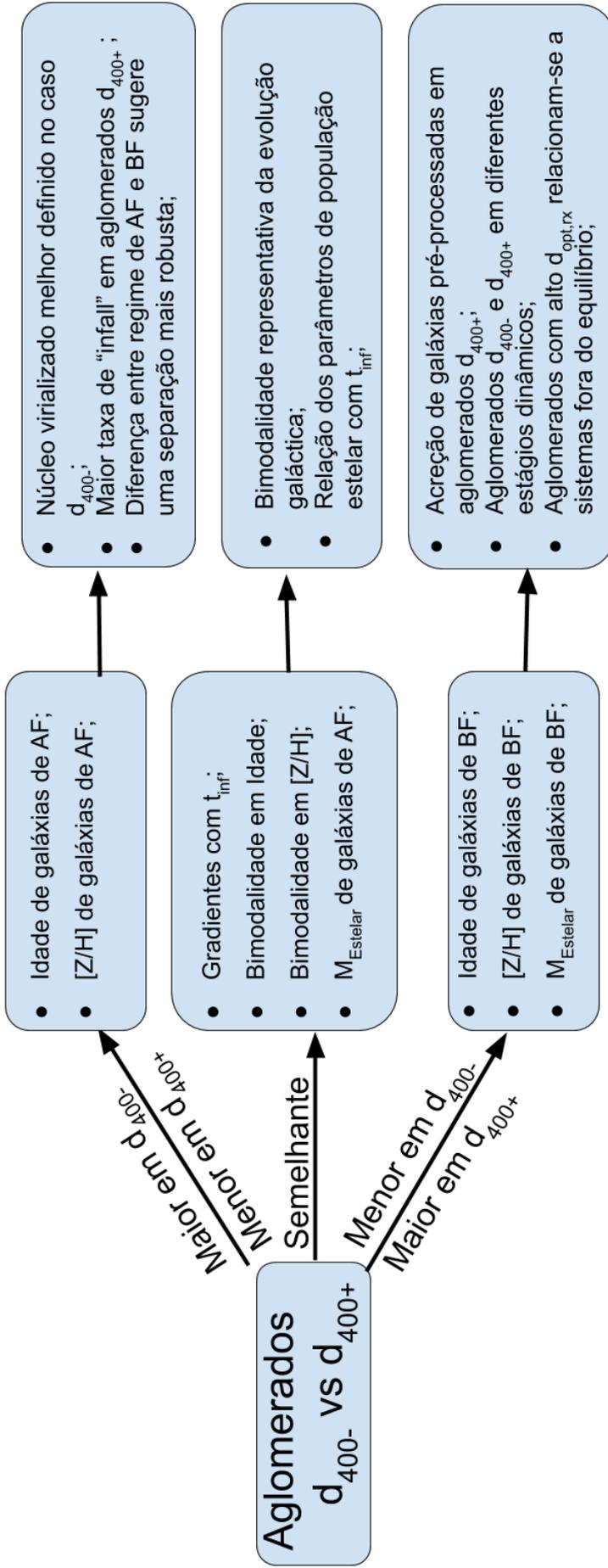


Figura 4.2 - Mapa esquemático dos principais resultados e conclusões quanto a comparação entre aglomerados  $d_{400-}$  e  $d_{400+}$ .



Uma outra abordagem, planejada para as próximas etapas deste trabalho, é localizar diferentes clusters (no sentido estatístico da palavra) no espaço TFEF vs Idade e investigar como as galáxias de cada “cluster” são distribuídas no EFP. Escolhemos esse espaço para o processo de “clustering” devido a já reconhecida bimodalidade entre NA e SV. Além disso, a influência do MIA nas galáxias membro pode estar relacionada à transição das mesmas pelo VV. Assim, podemos correlacionar o número de clusters com o estágio dinâmico do aglomerado.

Processos de clustering são uma pauta de longa data em estatística. Não existe um método absoluto sobre como definir o agrupamento do conjunto de parâmetros de população estelar de galáxias, no caso aqui tratado. Em geral, processos de “clustering” dependem do quão bem as populações dos dois conjuntos de dados estão separados. Caso os conjuntos estejam superpostos, o método utilizado deve possuir uma alta eficiência para ser capaz de distinguir os dois conjuntos. Como apresentado na Figura 1.1, o que observamos no caso de galáxias é um contínuo evolutivo. Assim, não podemos assumir que os conjuntos de parâmetros são bem separados e, conseqüentemente, precisamos utilizar um método que seja altamente eficaz em identificar diferentes conjuntos. Uma variável utilizada no processo de “clustering” que impacta diretamente o resultado final é o número de componentes a serem consideradas, ou seja, o número de “clusters” a serem encontrados no conjunto de dados.

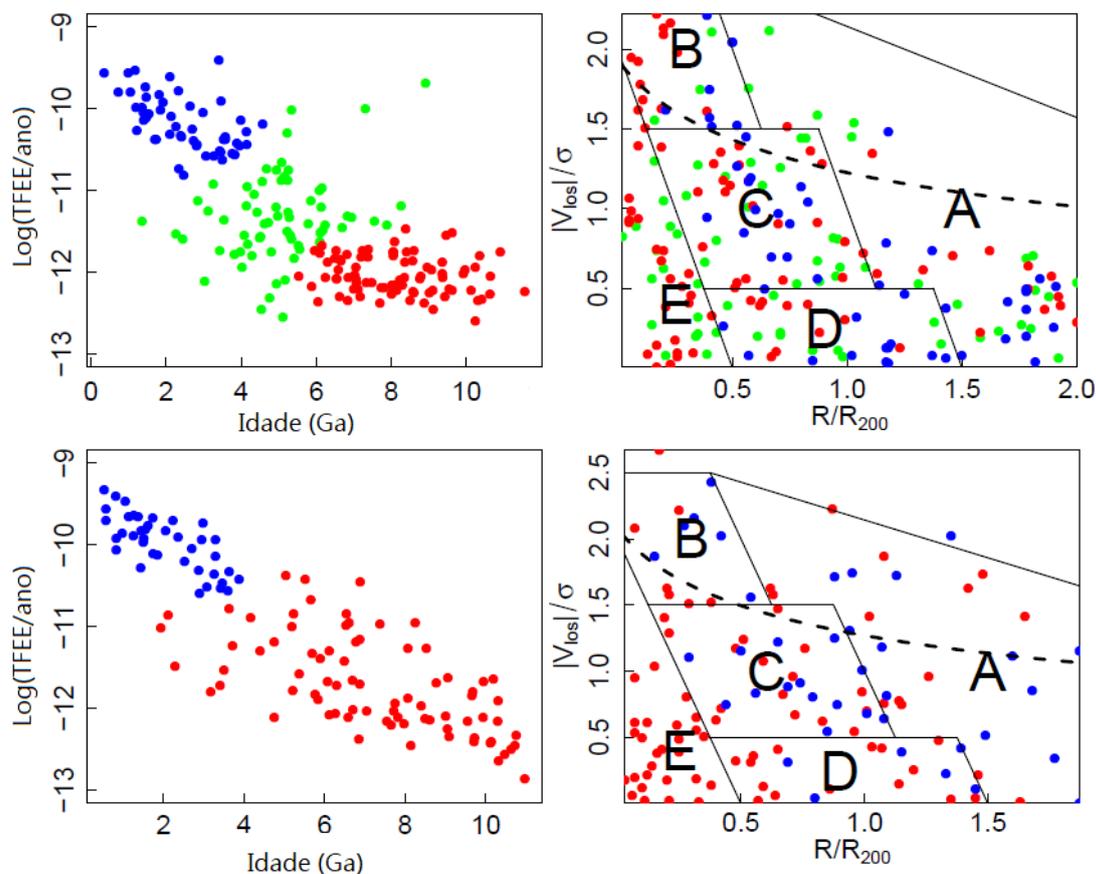
Nesta fase preliminar do trabalho que se segue, utilizamos um processo de “clustering” definido de forma Bayesiana Não-Paramétrica, no qual não é necessário especificar a priori quantos clusters existem no conjunto de dados. De forma resumida, uma abordagem Bayesiana utiliza a fórmula de Bayes para realizar inferência, a qual é atualizada a cada nova “evidência” disponível. Uma apresentação mais formal da teoria Bayesiana foge ao escopo desse texto, sendo indicado Müller e Mitra (2013) como referência para tal. Outra característica importante do processo de “clustering” aqui utilizado é a abordagem não paramétrica do problema. Um processo paramétrico estabelece a priori o número de parâmetros a serem determinados, enquanto no caso não-paramétrico parâmetros podem ser adicionados para melhor representar tendências observadas nos dados. A implementação de um processo não-paramétrico pode ser feita por meio de um Processo de Dirichlet, que, resumidamente, consiste em um processo onde as variáveis e amostragens são distribuições de probabilidade.

Utilizamos a função "BayesianGaussianMixture", disponível no pacote "scikitlearn", escrito em python, para realizar o processo de “clustering” desejado. Essa função é feita com base na formulação Bayesiana Não-Paramétrica descrita anteriormente,

todavia assume que todos os “clusters” possuem uma distribuição gaussiana. Sendo então uma Mistura Gaussiana Bayesiana Não-Paramétrica. A princípio o número de parâmetros em um processo não paramétrico pode ser considerado como infinito, todavia isso não corresponde a algo factível computacionalmente. Assim, é necessário impor um valor máximo no número de componentes possíveis de serem utilizadas pela função. Contudo, ressaltamos que definir um número máximo,  $N_{\max}$ , de componentes não implica que todas serão utilizadas no ajuste dos dados. Por utilizarmos o Processo de Dirichlet, são assinalados pesos a cada uma das  $N_c$  componentes. Assim, impondo um limite inferior no peso das componentes a serem consideradas ( $10^{-4}$  nesse caso) definimos o número de “clusters” que melhor representam nossos dados.

Como resultado preliminar, temos uma diferença entre o número de “clusters” encontrados para aglomerados Gaussianos e Não-Gaussianos. Analisamos os 177 aglomerados da Amostra 1 e encontramos que na maioria dos casos são identificados dois “clusters”, um relativo a população de alta Idade e baixa TFE (SV) e outro relativo a baixa Idade e alta TFE (NA). Enquanto nos aglomerados NG  $\sim 35\%$  possuem um terceiro “cluster”, no caso de aglomerados G essa porcentagem cai para 15%. Apesar de serem porcentagens consideradas baixas, o que ressaltamos aqui é a diferença entre aglomerados G e NG. Observado um excesso na porcentagem de aglomerados NG com um terceiro “cluster”, em comparação aos G, indicando uma relação entre o estágio dinâmico dos aglomerados e a população estelar de suas galáxias membro.

Figura 4.3 - Dois exemplos do processo de clustering aplicado ao espaço de TFEE por Idade (esquerda) e traduzido para o EFP (direita).



No EFP demarcamos as regiões de Rhee e a velocidade de escape do sistema para comparação. Os painéis superiores correspondem ao aglomerado Yang 021, considerado NG por dC17 e os de baixo correspondem ao aglomerado Yang 041, considerado G pelo mesmo trabalho.

A Figura 4.3 exemplifica as diferentes componentes encontradas em um aglomerado NG (superior) e um aglomerado G (inferior). No caso do aglomerado classificado por dC17 como NG (Yang 041), encontramos uma terceira componente (verde), indicando uma população em transição. Quando traduzido para o EFP, notamos que algumas galáxias assinaladas ao “cluster” verde ocupam toda a região do EFP. Já para o caso do aglomerado G (Yang 021), notamos que a região de virialização é povoada por galáxias pertencentes a somente um “cluster”. No segundo caso existem galáxias ocupando regiões semelhantes às encontradas no “cluster” em verde apresentado no primeiro caso, todavia o processo ainda assim as assinalam como pertencendo ao cluster “inferior”, ressaltando de fato a existência de uma terceira componente no aglomerado NG.

Finalmente, dois aspectos serão abordados no prosseguimento deste trabalho: 1) utilizar a simulação cosmológica ILLUSTRIS (NELSON *et al.*, 2015) e estudar a gaussianidade de aglomerados massivos ( $M \geq 10^{14}M_{\odot}$  em função do redshift, determinando assim como a taxa de “infall” altera o estado dinâmico desses sistemas; 2) ainda com a simulação ILLUSTRIS utilizaremos catálogos de aglomerados da simulação como conjunto de treino para o processo de “Deep Learning”, e assim treinar o algoritmo para medir automaticamente o estágio dinâmico de aglomerados observados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADI, M. G.; MOORE, B.; BOWER, R. G. Ram pressure stripping of spiral galaxies in clusters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 308, n. 4, p. 947–954, 1999. [67](#)
- ABAZAJIAN, K. N.; ADELMAN-MCCARTHY, J. K.; AGÜEROS, M. A.; ALLAM, S. S.; PRIETO, C. A.; AN, D.; ANDERSON, K. S.; ANDERSON, S. F.; ANNIS, J.; BAHCALL, N. A. The seventh data release of the sloan digital sky survey. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 182, n. 2, p. 543, 2009. [23](#)
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 23, n. 2, p. 193–212, 1952. [26](#)
- ANDRADE-SANTOS, F.; JONES, C.; FORMAN, W.; LOVISARI, L.; VIKHLININ, A.; WEEREN, R. van; MURRAY, S.; ARNAUD, M.; PRATT, G.; DEMOCLES, J. VizieR online data catalog: cool-core clusters with chandra obs.(andrade-santos+, 2017). **VizieR Online Data Catalog**, v. 184, 2018. [22](#)
- BARBERA, F. L.; CARVALHO, R. de; ROSA, I. de la; LOPES, P.; KOHL-MOREIRA, J.; CAPELATO, H. Spheroid's panchromatic investigation in different environmental regions (spider)-i. sample and galaxy parameters in the grizyjhk wavebands. **arXiv preprint arXiv:0912.4547**, 2009. [25](#)
- BEHROOZI, P. S.; WECHSLER, R. H.; WU, H.-Y. The rockstar phase-space temporal halo finder and the velocity offsets of cluster cores. **The Astrophysical Journal**, v. 762, n. 2, p. 109, 2012. [15](#)
- BEHROOZI, P. S.; WECHSLER, R. H.; WU, H.-Y.; BUSHA, M. T.; KLYPIN, A. A.; PRIMACK, J. R. Gravitationally consistent halo catalogs and merger trees for precision cosmology. **The Astrophysical Journal**, v. 763, n. 1, p. 18, 2012. [15](#)
- BHATTACHARYYA, A. On a measure of divergence between two statistical populations defined by their probability distributions. **Bulletin of the Calcutta Mathematical Society**, v. 35, p. 99–109, 1943. [27](#)
- BINNEY, J.; TREMAINE, S. **Galactic dynamics**. [S.l.]: Princeton university press, 2011. [6](#)

BLANTON, M. R.; SCHLEGEL, D. J.; STRAUSS, M. A.; BRINKMANN, J.; FINKBEINER, D.; FUKUGITA, M.; GUNN, J. E.; HOGG, D. W.; IVEZIĆ, Ž.; KNAPP, G. New york university value-added galaxy catalog: a galaxy catalog based on new public surveys. **The Astronomical Journal**, v. 129, n. 6, p. 2562, 2005. [21](#)

BÖHRINGER, H.; SCHUECKER, P.; GUZZO, L.; COLLINS, C.; VOGES, W.; CRUDDACE, R.; ORTIZ-GIL, A.; CHINCARINI, G.; GRANDI, S. D.; EDGE, A. The rosat-eso flux limited x-ray (reflex) galaxy cluster survey-v. the cluster catalogue. **Astronomy & Astrophysics**, v. 425, n. 1, p. 367–383, 2004. [22](#)

BÖHRINGER, H.; VOGES, W.; HUCHRA, J.; MCLEAN, B.; GIACCONI, R.; ROSATI, P.; BURG, R.; MADER, J.; SCHUECKER, P.; SIMIĆ, D. The northern rosat all-sky (noras) galaxy cluster survey. i. x-ray properties of clusters detected as extended x-ray sources. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 129, n. 2, p. 435, 2000. [22](#)

BOSELLI, A.; CORTESE, L.; BOQUIEN, M.; BOISSIER, S.; CATINELLA, B.; GAVAZZI, G.; LAGOS, C.; SAINTONGE, A. Cold gas properties of the herschel reference survey-iii. molecular gas stripping in cluster galaxies. **Astronomy & Astrophysics**, v. 564, p. A67, 2014. [12](#)

BRUZUAL, G.; CHARLOT, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 344, n. 4, p. 1000–1028, Oct 2003. [25](#)

CAPELATO, H.; GERBAL, D.; SALVADOR-SOLE, E.; MATHEZ, G.; MAZURE, A.; SOL, H. On the luminosity-segregation in rich clusters of galaxies application to coma. **The Astrophysical Journal**, v. 241, p. 521–527, 1980. [69](#)

CARLBERG, R.; YEE, H.; ELLINGSON, E.; MORRIS, S.; ABRAHAM, R.; GRAVEL, P.; PRITCHET, C.; SMECKER-HANE, T.; HARTWICK, F.; HESSER, J. The dynamical equilibrium of galaxy clusters. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 476, n. 1, p. L7, 1997. [67](#)

CARVALHO, R. de; RIBEIRO, A.; STALDER, D.; ROSA, R.; COSTA, A.; MOURA, T. Investigating the relation between galaxy properties and the gaussianity of the velocity distribution of groups and clusters. **The Astronomical Journal**, v. 154, n. 3, p. 96, 2017. [14](#), [19](#), [21](#), [25](#), [26](#), [28](#), [30](#), [31](#), [67](#), [68](#), [89](#)

CARVALHO, R. R. de; COSTA, A. P.; MOURA, T. C.; RIBEIRO, A. L. B. The mass density profile and star formation history of Gaussian and non-Gaussian

- clusters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 487, n. 1, p. L86–L90, jul. 2019. [70](#)
- COHEN, S. A.; HICKOX, R. C.; WEGNER, G. A.; EINASTO, M.; VENNIK, J. Star formation and supercluster environment of 107 nearby galaxy clusters. **The Astrophysical Journal**, v. 835, n. 1, p. 56, 2017. [15](#)
- COSTA, A.; RIBEIRO, A.; CARVALHO, R. de. The shape of velocity dispersion profiles and the dynamical state of galaxy clusters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 473, n. 1, p. L31–L35, 2018. [70](#)
- DRESSLER, A. Galaxy morphology in rich clusters-implications for the formation and evolution of galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 236, p. 351–365, 1980. [67](#)
- DRESSLER, A.; SHECTMAN, S. A. Evidence for substructure in rich clusters of galaxies from radial-velocity measurements. **The Astronomical Journal**, v. 95, p. 985–995, 1988. [14](#)
- ELLINGSON, E.; LIN, H.; YEE, H.; CARLBERG, R. The evolution of population gradients in galaxy clusters: the butcher-oemler effect and cluster infall. **The Astrophysical Journal**, v. 547, n. 2, p. 609, 2001. [67](#)
- FERNANDES, R. C.; MATEUS, A.; SODRÉ, L.; STASIŃSKA, G.; GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of sloan digital sky survey galaxies–i. spectral synthesis method. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 358, n. 2, p. 363–378, 2005. [21](#), [24](#)
- FILION, G. J. The signed kolmogorov-smirnov test: why it should not be used. **GigaScience**, v. 4, n. 1, p. s13742–015, 2015. [157](#)
- FRALEY, C.; RAFTERY, A. **MCLUST: Software for model-based cluster and discriminant analysis**. [S.l.: s.n.], 1998. [26](#)
- GENEL, S.; GENZEL, R.; BOUCHÉ, N.; NAAB, T.; STERNBERG, A. The halo merger rate in the millennium simulation and implications for observed galaxy merger fractions. **The Astrophysical Journal**, v. 701, n. 2, p. 2002, 2009. [67](#), [72](#)
- GIBBONS, J. Collisionless boltzmann equations and integrable moment equations. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 3, n. 3, p. 503–511, 1981. [5](#)
- GUO, Q.; WHITE, S.; ANGULO, R. E.; HENRIQUES, B.; LEMSON, G.; BOYLAN-KOLCHIN, M.; THOMAS, P.; SHORT, C. Galaxy formation in wmap 1

- and wmap 7 cosmologies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 428, n. 2, p. 1351–1365, 2012. 19
- HAN, S.; SMITH, R.; CHOI, H.; CORTESE, L.; CATINELLA, B.; CONTINI, E.; SUKYOONG, K. Y. Yzics: Preprocessing of dark halos in the hydrodynamic zoom-in simulation of clusters. **The Astrophysical Journal**, v. 866, n. 2, p. 78, 2018. 19
- HELGUERO, F. de. Sui massimi delle curve dimorfiche. **Biometrika**, v. 3, n. 1, p. 84–98, 1904. 26
- HERNQUIST, L. An analytical model for spherical galaxies and bulges. **The Astrophysical Journal**, v. 356, p. 359–364, 1990. 12
- HOU, A.; PARKER, L. C.; HARRIS, W. E.; WILMAN, D. J. Statistical tools for classifying galaxy group dynamics. **The Astrophysical Journal**, v. 702, n. 2, p. 1199, 2009. 14
- JÁCHYM, P.; KENNEY, J. D.; SUN, M.; COMBES, F.; CORTESE, L.; SCOTT, T. C.; SIVANANDAM, S.; BRINKS, E.; ROEDIGER, E.; PALOUŠ, J. Alma unveils widespread molecular gas clumps in the ram pressure stripped tail of the norma jellyfish galaxy. **The Astrophysical Journal**, v. 883, n. 2, p. 145, 2019. 11
- JANSEN, F.; LUMB, D.; ALTIERI, B.; CLAVEL, J.; EHLE, M.; ERD, C.; GABRIEL, C.; GUAINAZZI, M.; GONDOIN, P.; MUCH, R. Xmm-newton observatory-i. the spacecraft and operations. **Astronomy & Astrophysics**, v. 365, n. 1, p. L1–L6, 2001. 22
- JEANS, J. H. The stability of a spherical nebula. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 68, n. 442-450, p. 454–455, 1901. 3
- KLYPIN, A.; YEPES, G.; GOTTLÖBER, S.; PRADA, F.; HESS, S. Multidark simulations: the story of dark matter halo concentrations and density profiles. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 457, n. 4, p. 4340–4359, 2016. 15
- KOHL, M.; RUCKDESCHEL, P.; KOHL, M. M. Package ‘distrex’. **dim**, v. 16, p. 1, 2019. 29
- KRAVTSOV, A. V.; BORGANI, S. Formation of galaxy clusters. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 50, p. 353–409, 2012. 25

- LILLIEFORS, H. W. On the kolmogorov-smirnov test for normality with mean and variance unknown. **Journal of the American Statistical Association**, v. 62, n. 318, p. 399–402, 1967. 26
- LOPES, P.; CARVALHO, R. D.; KOHL-MOREIRA, J.; JONES, C. Nosocs in sdss–i. sample definition and comparison of mass estimates. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 392, n. 1, p. 135–152, 2008. 23, 39
- LOVISARI, L.; REIPRICH, T. The non-uniformity of galaxy cluster metallicity profiles. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 483, n. 1, p. 540–557, 2018. 22
- LOWRY, R. Concepts and applications of inferential statistics. 2003. **Disponível em: <http://vassarstats.net/textbook/ch14pt2.html>**, 2014. 156
- LYNDEN-BELL, D. Statistical mechanics of violent relaxation in stellar systems. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 136, p. 101, 1967. 6
- MAHAJAN, S.; MAMON, G. A.; RAYCHAUDHURY, S. The velocity modulation of galaxy properties in and near clusters: quantifying the decrease in star formation in backplash galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 416, n. 4, p. 2882–2902, 2011. 18, 39
- MAN, A.; BELLI, S. Star formation quenching in massive galaxies. **Nature Astronomy**, v. 2, n. 9, p. 695, 2018. 8
- MERRALL, T. E.; HENRIKSEN, R. N. Relaxation of a collisionless system and the transition to a new equilibrium velocity distribution. **The Astrophysical Journal**, v. 595, n. 1, p. 43, 2003. 14
- MISTANI, P. A.; SALES, L. V.; PILLEPICH, A.; SANCHEZ-JANSSEN, R.; VOGELSBERGER, M.; NELSON, D.; RODRIGUEZ-GOMEZ, V.; TORREY, P.; HERNQUIST, L. On the assembly of dwarf galaxies in clusters and their efficient formation of globular clusters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 455, n. 3, p. 2323–2336, 2015. 13
- MÜLLER, P.; MITRA, R. Bayesian nonparametric inference—why and how. **Bayesian Analysis**, v. 8, n. 2, 2013. 76
- NAVARRO, J. F.; FRENK, C. S.; WHITE, S. D. M. The structure of cold dark matter halos. **The Astrophysical Journal**, v. 462, p. 563, May 1996. 17

NELSON, D.; PILLEPICH, A.; GENEL, S.; VOGELSBERGER, M.; SPRINGEL, V.; TORREY, P.; RODRIGUEZ-GOMEZ, V.; SIJACKI, D.; SNYDER, G. F.; GRIFFEN, B. The illustris simulation: Public data release. **Astronomy and Computing**, v. 13, p. 12–37, 2015. 79

PACCAGNELLA, A.; VULCANI, B.; POGGIANTI, B. M.; MORETTI, A.; FRITZ, J.; GULLIEUSZIK, M.; COUCH, W.; BETTONI, D.; CAVA, A.; D'ONOFRIO, M. Slow quenching of star formation in omegawings clusters: galaxies in transition in the local universe. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 816, n. 2, p. L25, 2016. 70

PASQUALI, A.; SMITH, R.; GALLAZZI, A.; LUCIA, G. D.; ZIBETTI, S.; HIRSCHMANN, M.; YI, S. Physical properties of sdss satellite galaxies in projected phase space. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 484, n. 2, p. 1702–1723, 2019. xv, 18, 19, 37, 39, 40, 41, 43, 49, 70, 71, 73

PIFFARETTI, R.; ARNAUD, M.; PRATT, G.; POINTECOUTEAU, E.; MELIN, J.-B. The mcxc: a meta-catalogue of x-ray detected clusters of galaxies. **Astronomy & Astrophysics**, v. 534, p. A109, 2011. 22

REIPRICH, T. H.; BOEHRINGER, H. The mass function of an x-ray flux-limited sample of galaxy clusters. **The Astrophysical Journal**, v. 567, n. 2, p. 716, 2002. 22

RHEE, J.; SMITH, R.; CHOI, H.; SUKYOUNG, K. Y.; JAFFÉ, Y.; CANDLISH, G.; SÁNCHEZ-JÁNSSEN, R. Phase-space analysis in the group and cluster environment: time since infall and tidal mass loss. **The Astrophysical Journal**, v. 843, n. 2, p. 128, 2017. 18, 19, 37, 38, 39, 42, 43, 67, 69, 73, 161

RIBEIRO, A.; CARVALHO, R. de; TREVISAN, M.; CAPELATO, H.; BARBERA, F. L.; LOPES, P.; SCHILLING, A. Spider–ix. classifying galaxy groups according to their velocity distribution. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 434, n. 1, p. 784–795, 2013. 14, 15, 16, 21, 25, 26, 29, 67, 68

ROBERTS, I. D.; PARKER, L. C. Evidence of pre-processing and a dependence on dynamical state for low-mass satellite galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 467, n. 3, p. 3268–3278, 2017. 33, 42, 67, 68, 69

\_\_\_\_\_. ‘observing’ unrelaxed clusters in dark matter simulations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 490, n. 1, p. 773–783, 2019. 14, 15, 16, 19, 25, 70, 71, 72

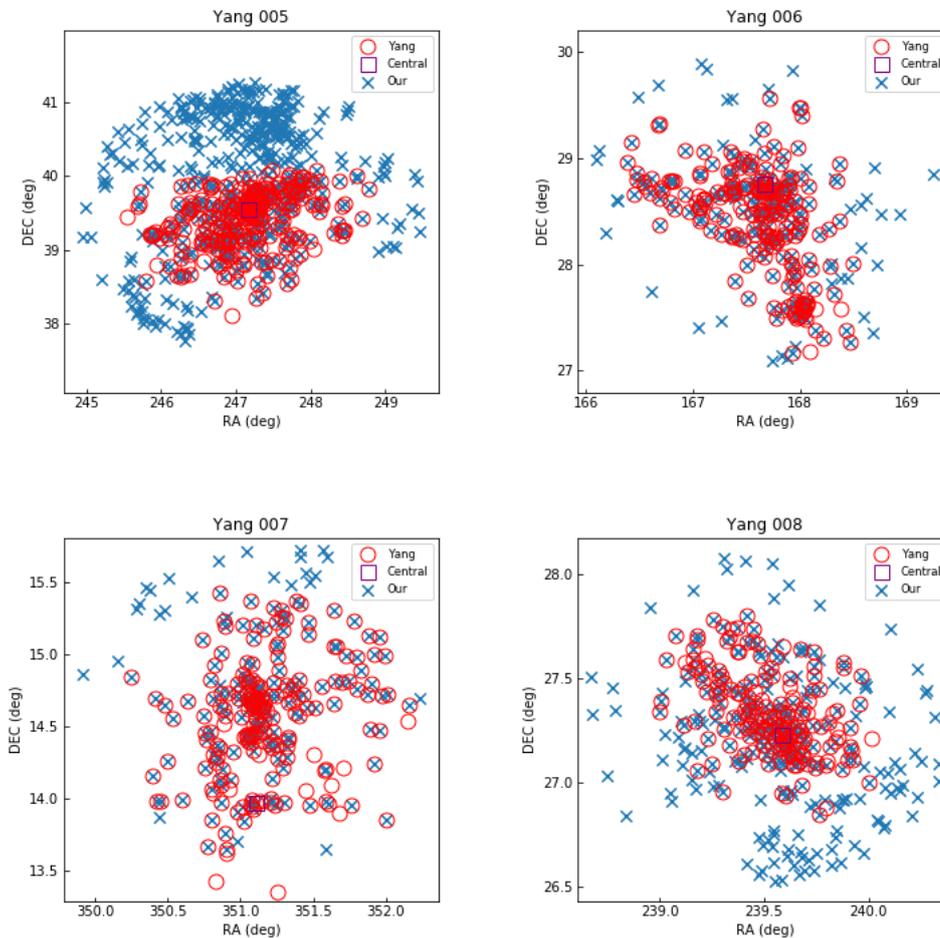
- ROBERTS, I. D.; PARKER, L. C.; BROWN, T.; JOSHI, G. D.; HLAVACEK-LARRONDO, J.; WADSLEY, J. Quenching low-mass satellite galaxies: evidence for a threshold icm density. **The Astrophysical Journal**, v. 873, n. 1, p. 42, 2019. [11](#), [12](#), [13](#), [69](#), [70](#)
- SANCHEZ-BLAZQUEZ, P.; PELETIER, R.; JIMÉNEZ-VICENTE, J.; CARDIEL, N.; CENARRO, A. J.; FALCON-BARROSO, J.; GORGAS, J.; SELAM, S.; VAZDEKIS, A. Medium-resolution isaac newton telescope library of empirical spectra. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 371, n. 2, p. 703–718, 2006. [25](#)
- SCHAWINSKI, K.; URRY, C. M.; SIMMONS, B. D.; FORTSON, L.; KAVIRAJ, S.; KEEL, W. C.; LINTOTT, C. J.; MASTERS, K. L.; NICHOL, R. C.; SARZI, M. The green valley is a red herring: galaxy zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early-and late-type galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 440, n. 1, p. 889–907, 2014. [9](#)
- SEARS, F. W.; SALINGER, G. L. **Termodinâmica, teoria cinética e termodinâmica estatística**. [S.l.]: Guanabara Dois, 1979. [7](#)
- STRATEVA, I.; IVEZIĆ, Ž.; KNAPP, G. R.; NARAYANAN, V. K.; STRAUSS, M. A.; GUNN, J. E.; LUPTON, R. H.; SCHLEGEL, D.; BAHCALL, N. A.; BRINKMANN, J. Color separation of galaxy types in the sloan digital sky survey imaging data. **The Astronomical Journal**, v. 122, n. 4, p. 1861, 2001. [7](#)
- TAUBER, J.; ESA; Planck scientific collaboration. The planck mission. **Advances in Space Research**, v. 34, n. 3, p. 491–496, 2004. [22](#)
- TRÜMPER, J. The rosat mission. **Advances in Space Research**, v. 2, n. 4, p. 241–249, 1982. [22](#)
- TRUSSLER, J.; MAIOLINO, R.; MARASTON, C.; PENG, Y.; THOMAS, D.; GODDARD, D.; LIAN, J. Starvation as the primary quenching mechanism in galaxies. **arXiv preprint arXiv:1811.09283**, 2018. [8](#)
- VOGELSBERGER, M.; GENEL, S.; SPRINGEL, V.; TORREY, P.; SIJACKI, D.; XU, D.; SNYDER, G.; NELSON, D.; HERNQUIST, L. Introducing the illustris project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the universe. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 444, n. 2, p. 1518–1547, 2014. [25](#)

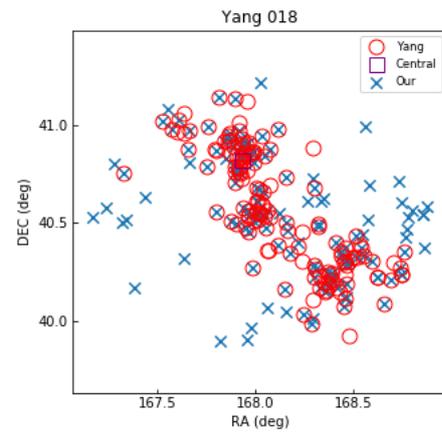
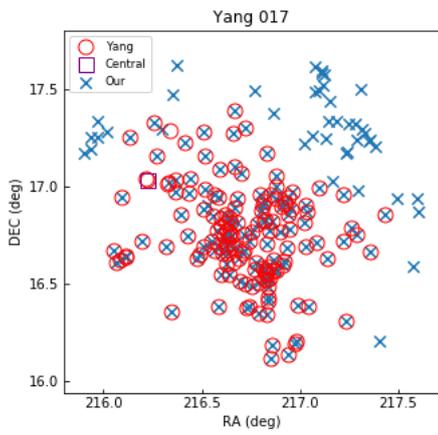
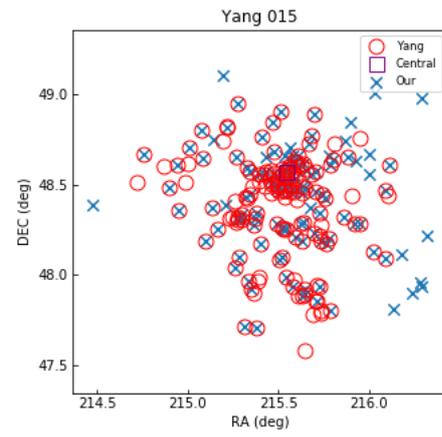
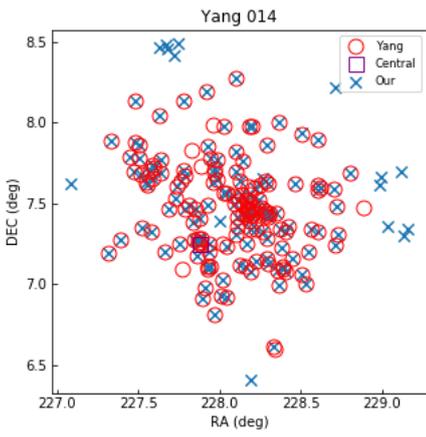
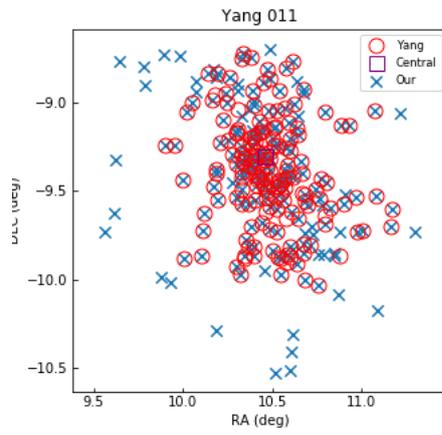
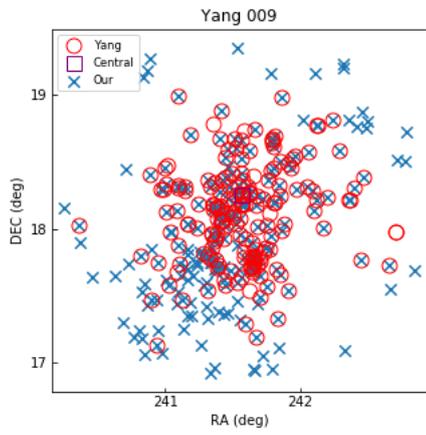
- WEISSKOPF, M.; BRINKMAN, B.; CANIZARES, C.; GARMIRE, G.; MURRAY, S.; SPEYBROECK, L. V. An overview of the performance and scientific results from the chandra x-ray observatory. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 114, n. 791, p. 1, 2002. 12
- WEISSKOPF, M. C.; TANANBAUM, H. D.; SPEYBROECK, L. P. V.; O'DELL, S. L. **Chandra X-ray Observatory (CXO): overview**. [S.l.: s.n.], 2000. 2–16 p. 22
- WETZEL, A. R.; TINKER, J. L.; CONROY, C.; BOSCH, F. C. van den. Galaxy evolution in groups and clusters: satellite star formation histories and quenching time-scales in a hierarchical universe. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 432, n. 1, p. 336–358, 2013. 12, 13
- YAHIL, A.; VIDAL, N. The velocity distribution of galaxies in clusters. **The Astrophysical Journal**, v. 214, p. 347–350, 1977. 14
- YANG, X.; MO, H.; BOSCH, F. C. V. D.; JING, Y. A halo-based galaxy group finder: calibration and application to the 2dfgrs. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 356, n. 4, p. 1293–1307, 2005. 21
- YANG, X.; MO, H.; BOSCH, F. C. Van den; PASQUALI, A.; LI, C.; BARDEN, M. Galaxy groups in the sdss dr4. i. the catalog and basic properties. **The Astrophysical Journal**, v. 671, n. 1, p. 153, 2007. xv, 14, 21, 23, 24, 35, 89, 151, 152

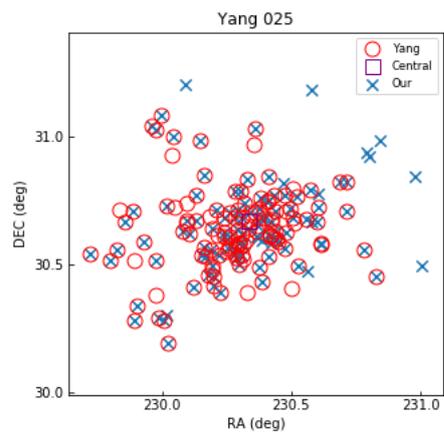
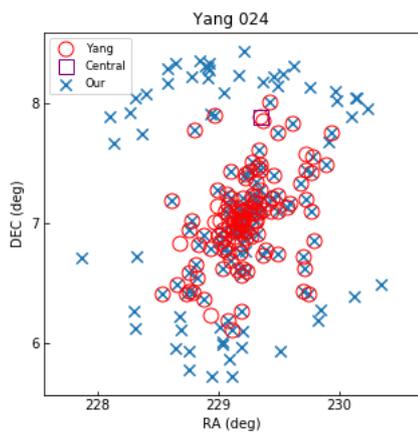
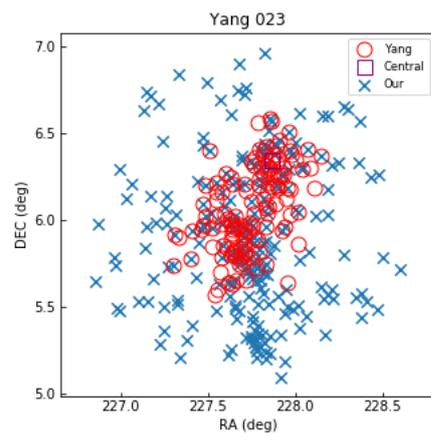
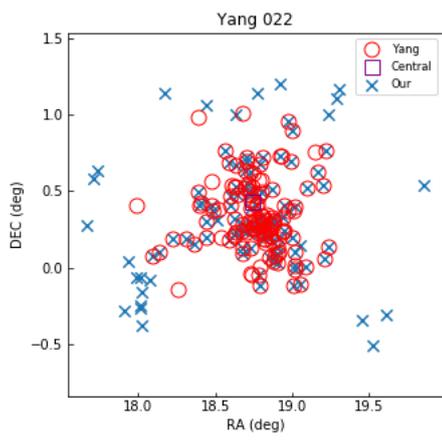
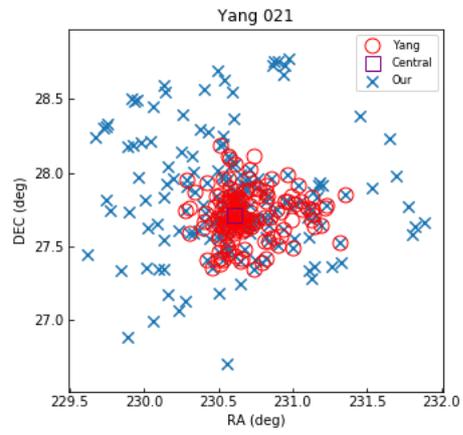
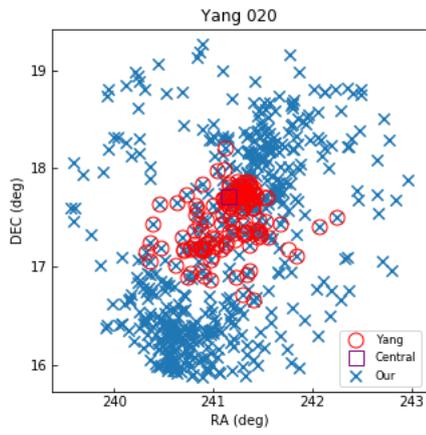
## APÊNDICE A - GALÁXIAS EM CADA CATÁLOGO

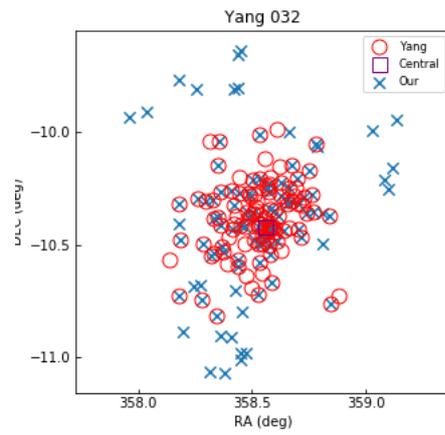
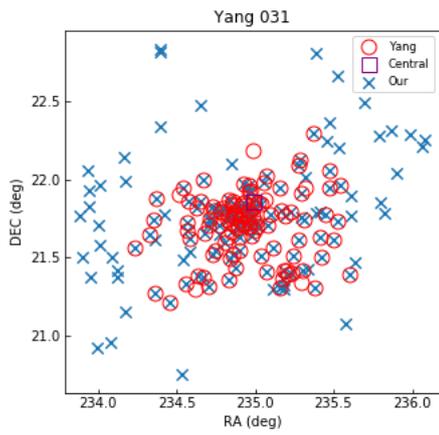
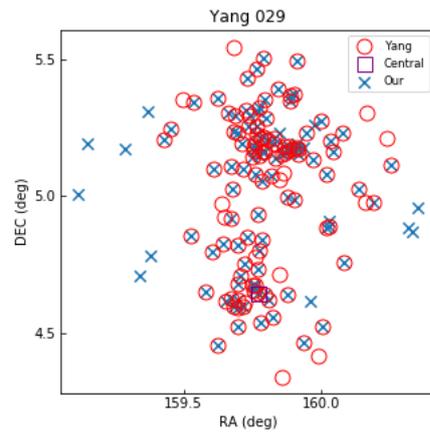
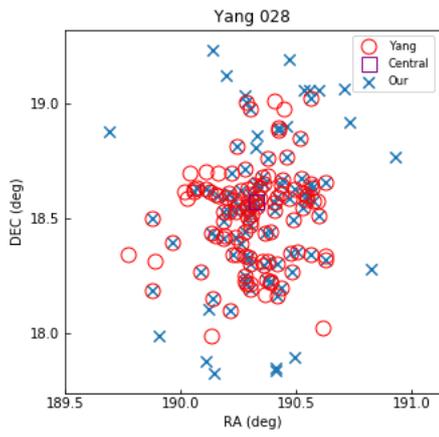
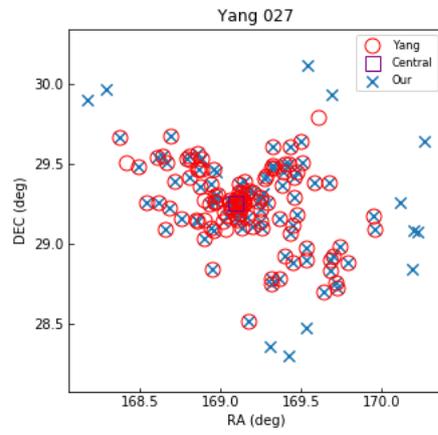
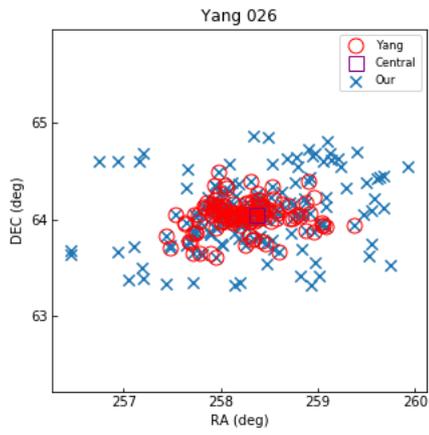
Neste apêndice apresentamos o espaço AR vs DEC de cada um dos 177 aglomerados, destacando quais pertencem a cada um dos catálogos (dC17 e Yang). A Amostra 1 contém 11160 galáxias considerando a seleção feita originalmente por Yang et al. (2007). Já a redefinição feita por Carvalho et al. (2017) inclui um número de galáxias consideravelmente maior, 18250. Isso representa uma considerável diferença de 40% entre as definições, em sua maioria relacionada a regiões exteriores.

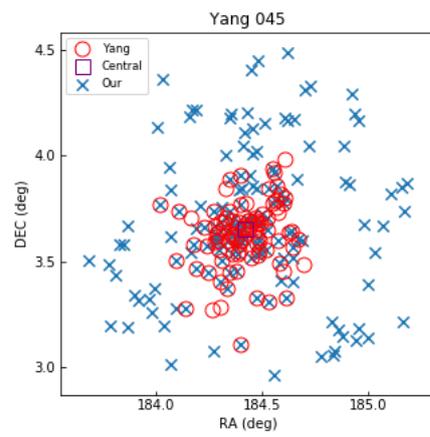
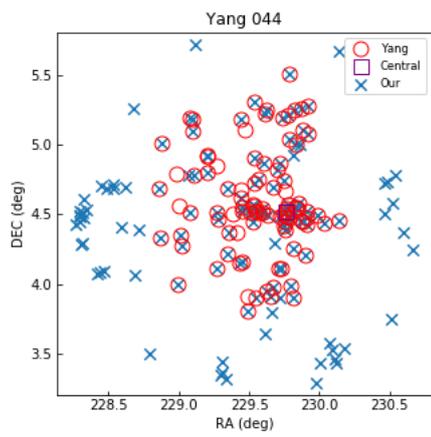
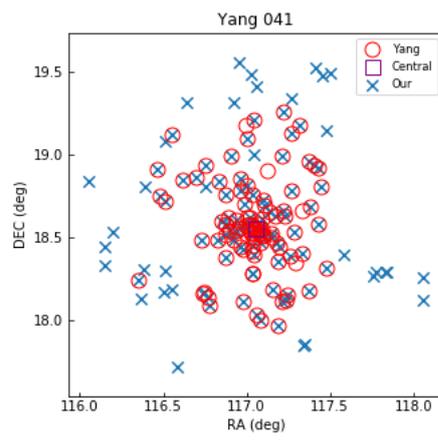
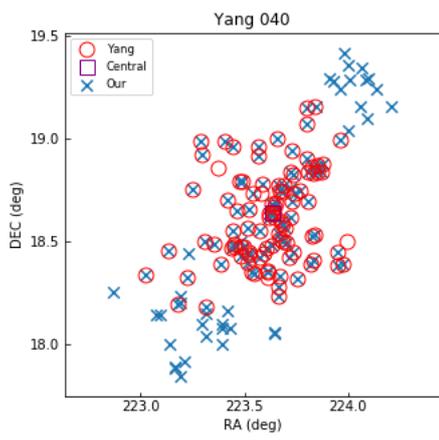
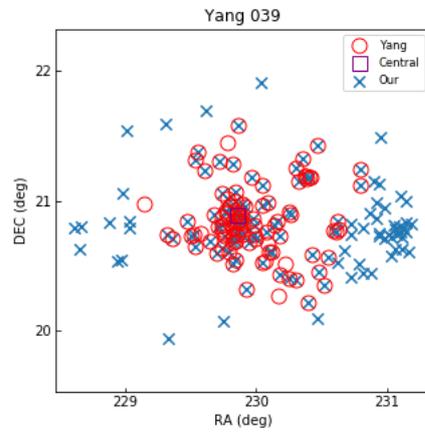
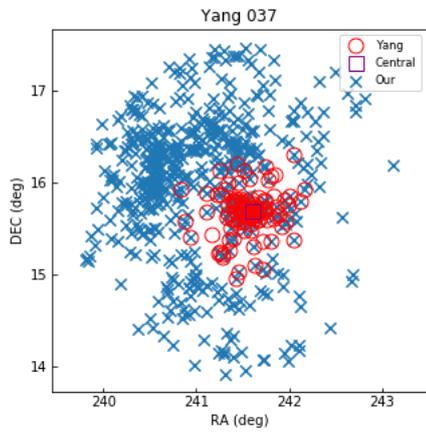
Figura A.1 - Comparação entre galáxias dos dois catálogos.

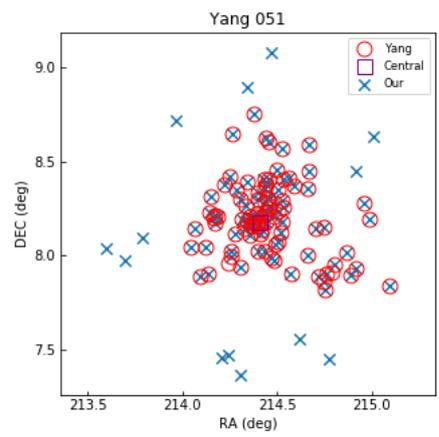
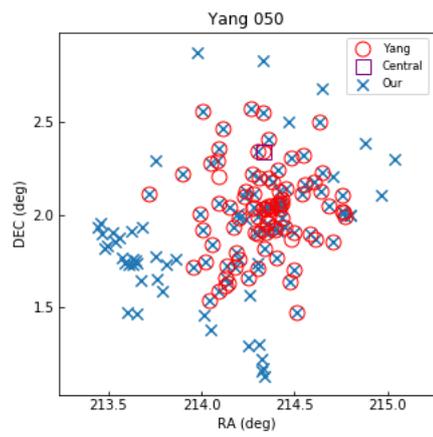
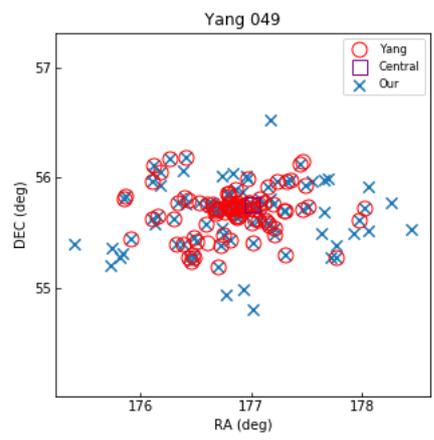
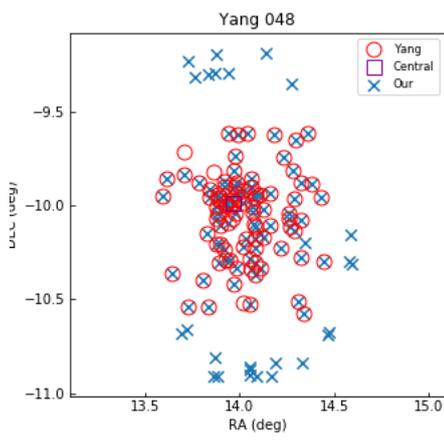
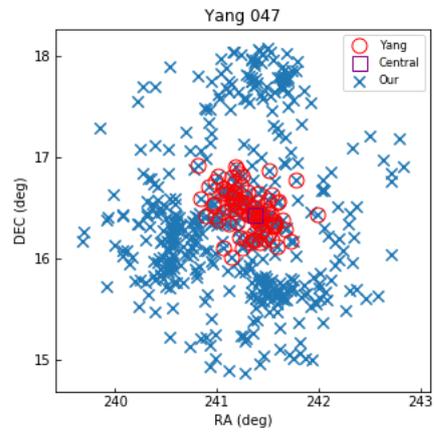
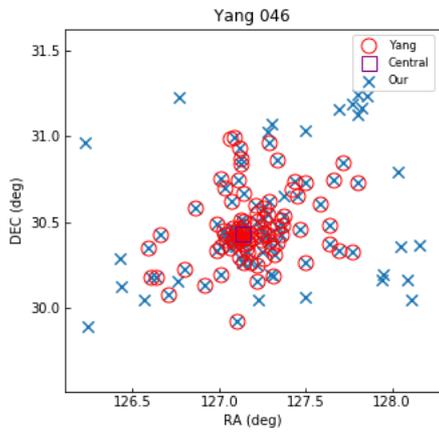


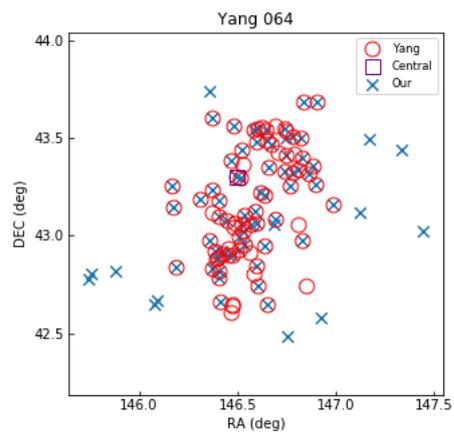
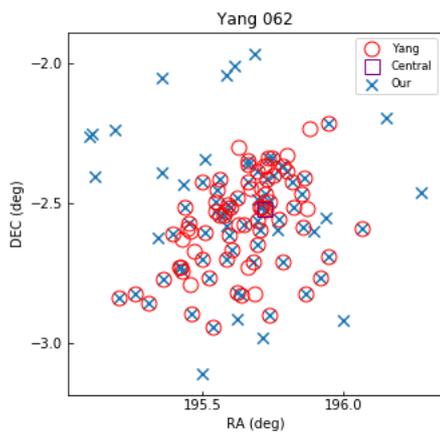
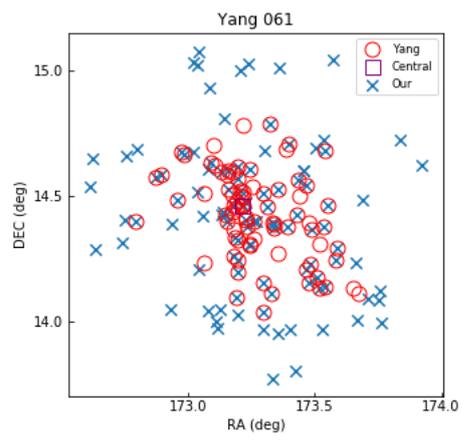
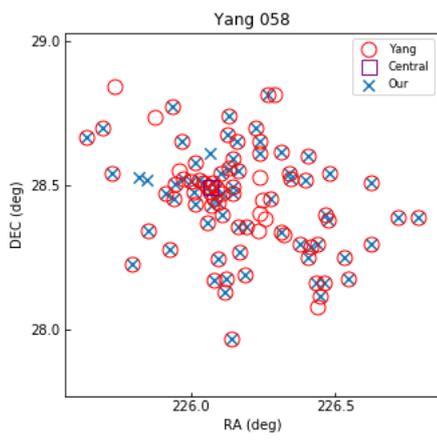
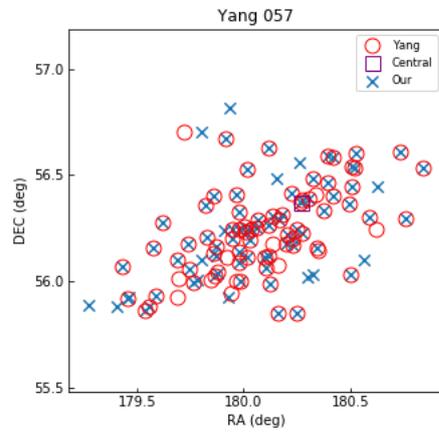
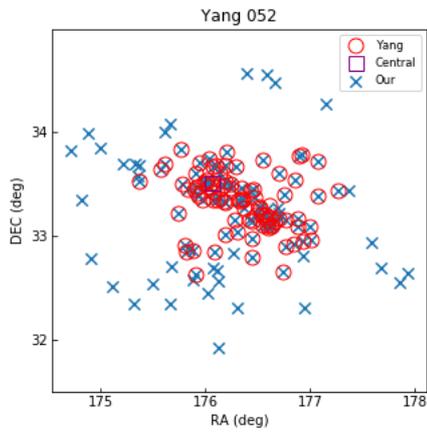


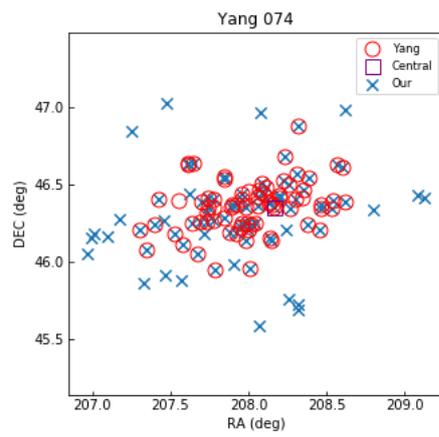
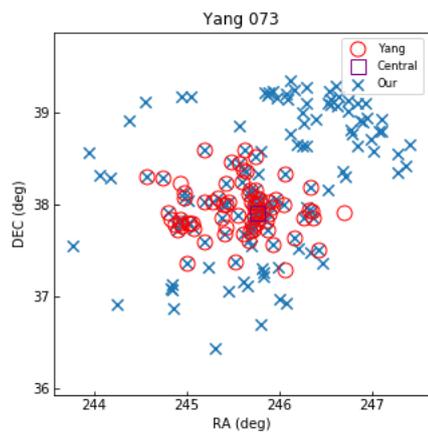
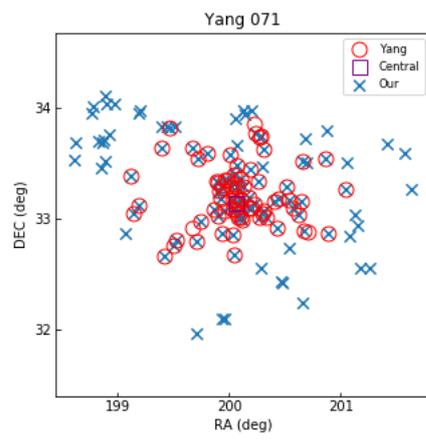
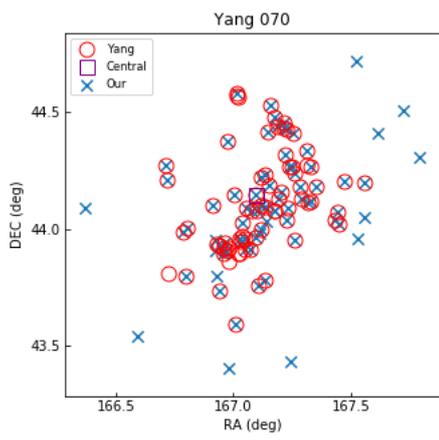
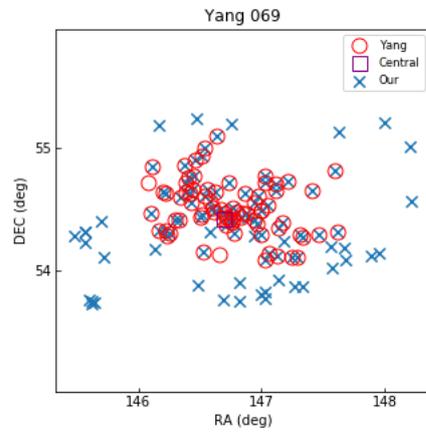
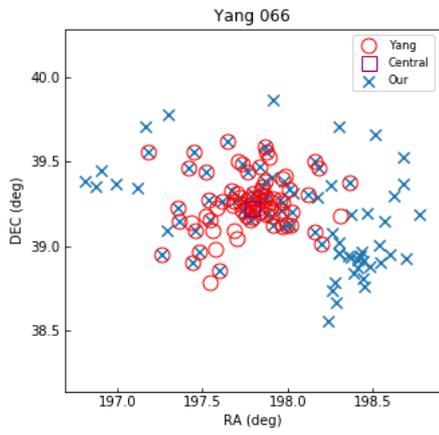


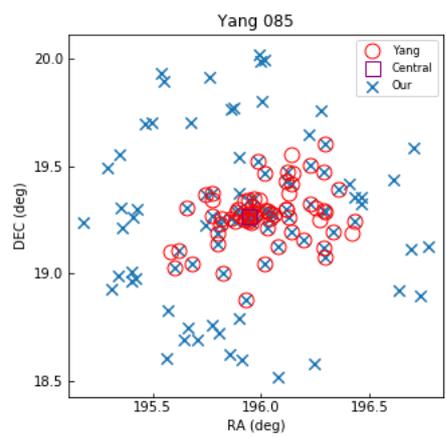
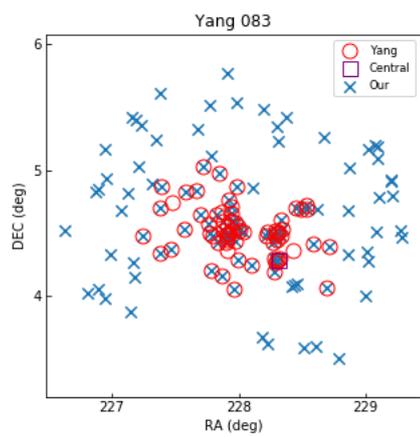
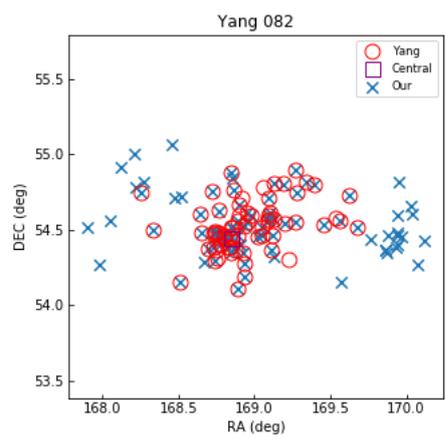
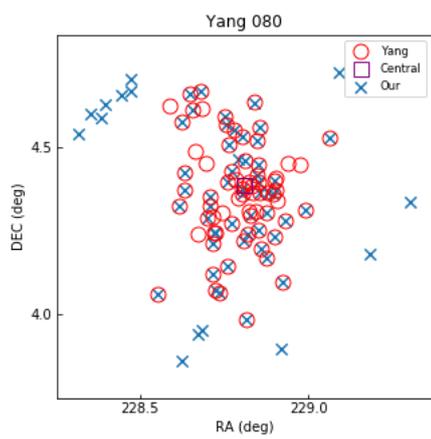
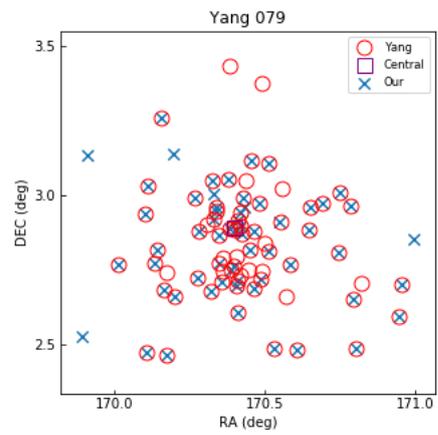
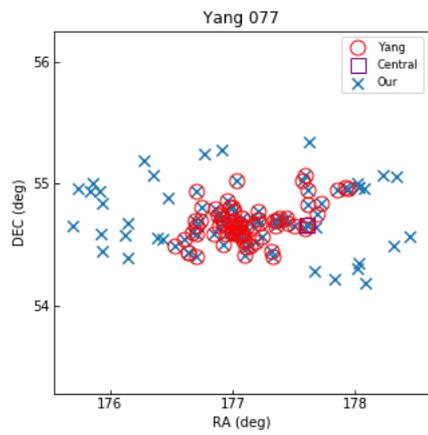


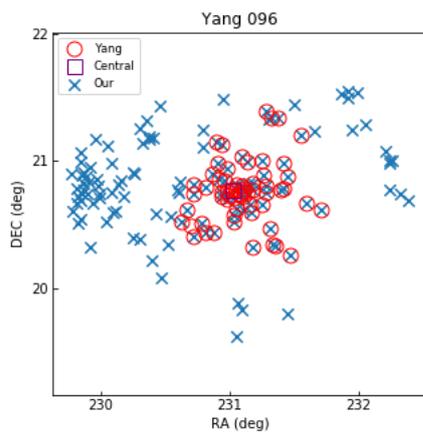
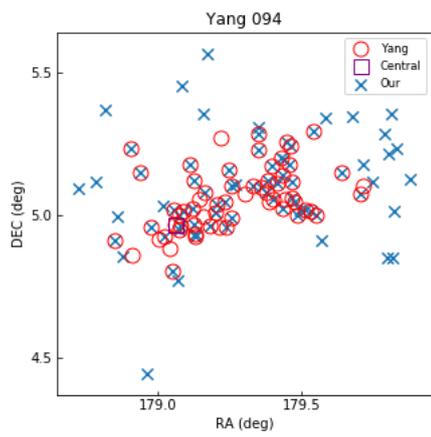
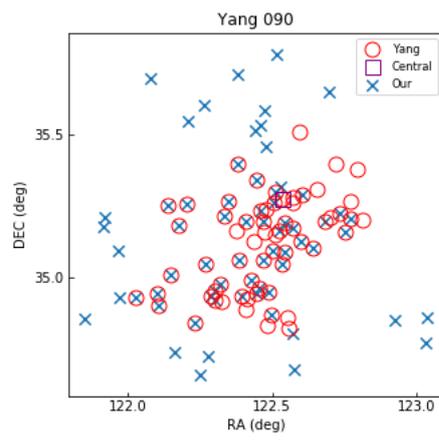
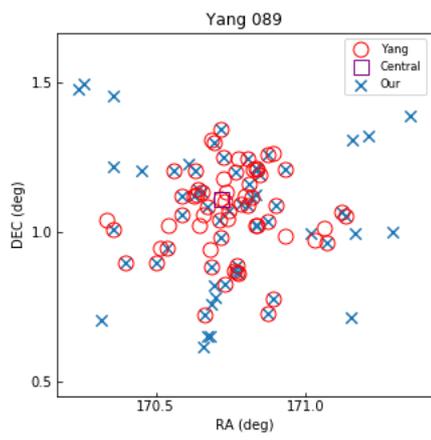
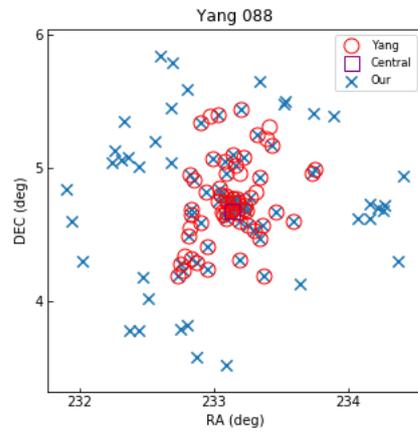
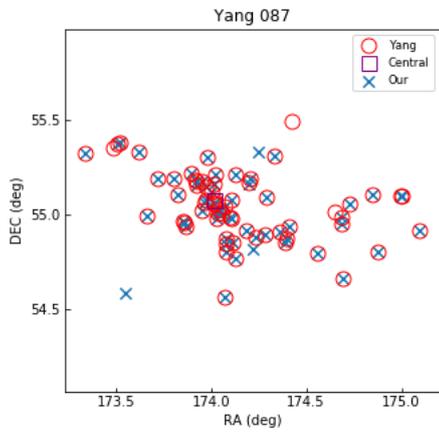


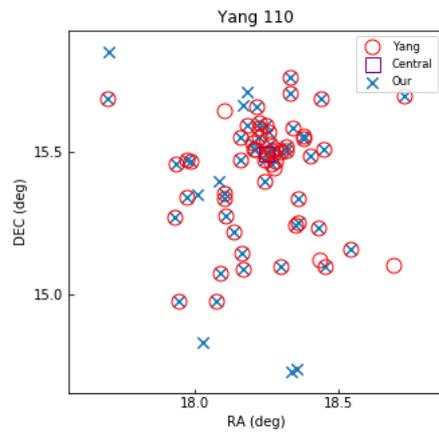
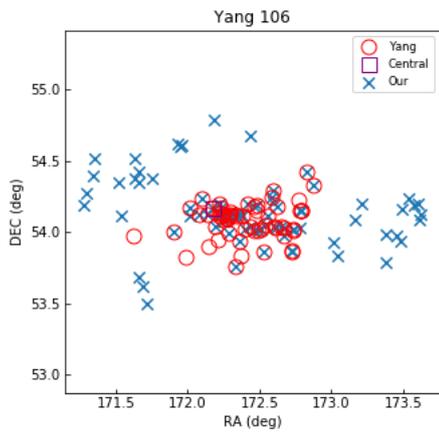
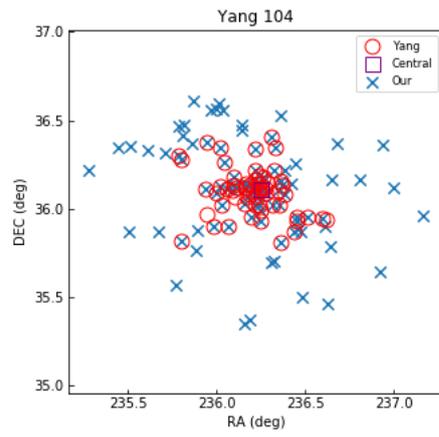
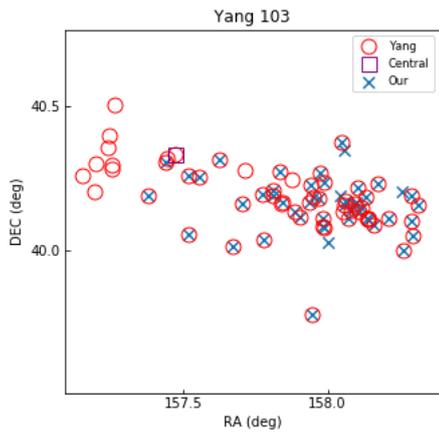
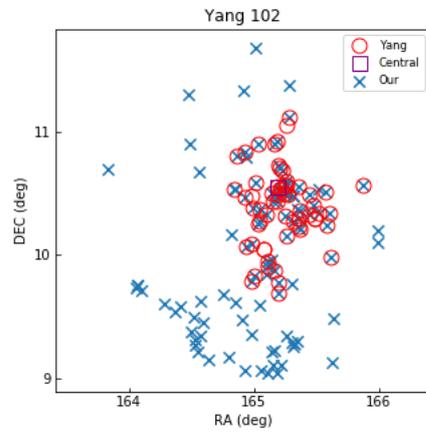
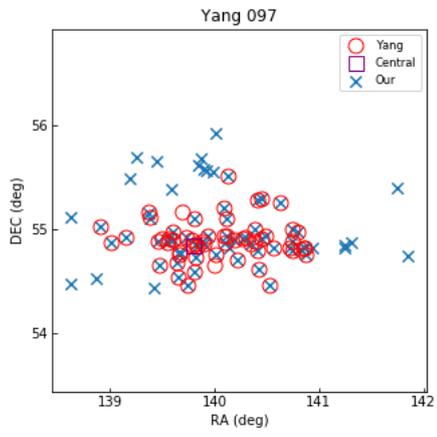


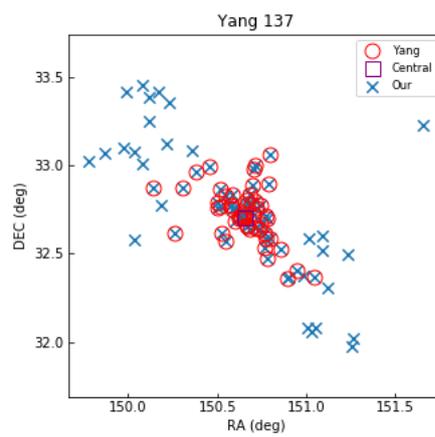
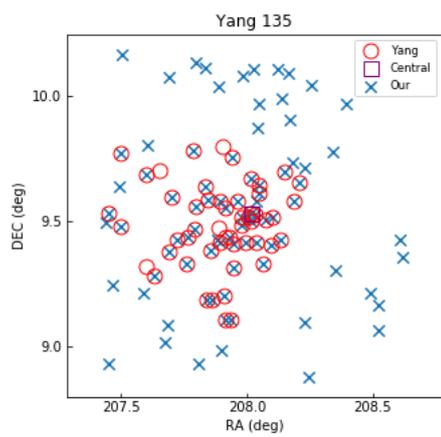
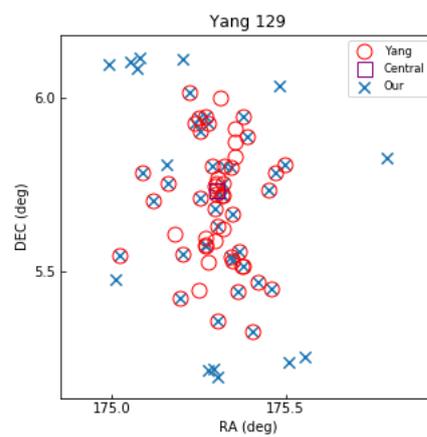
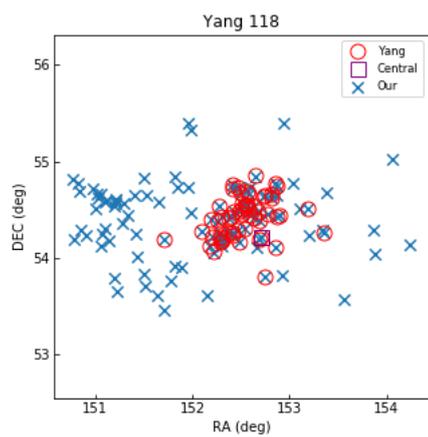
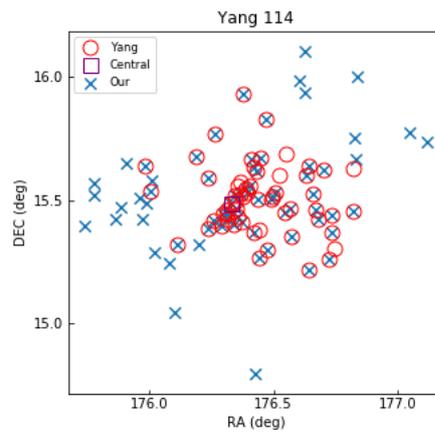
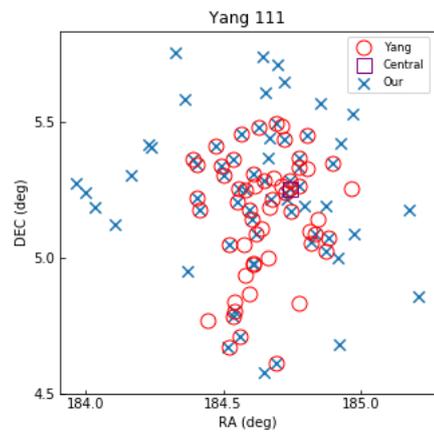


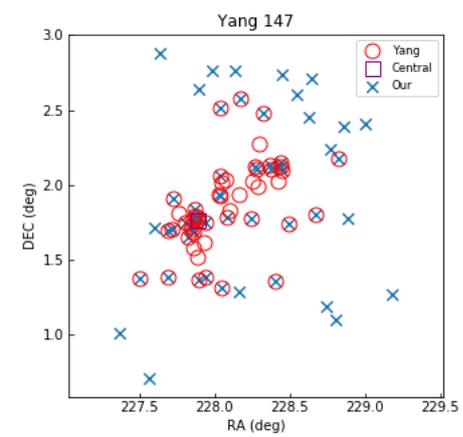
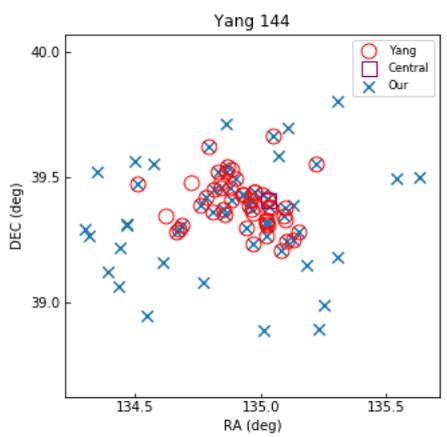
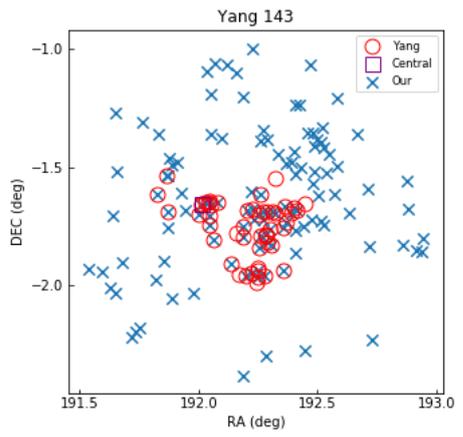
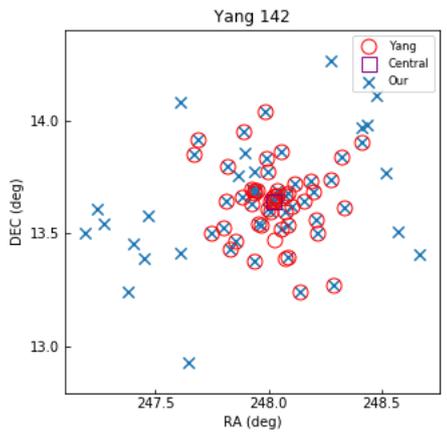
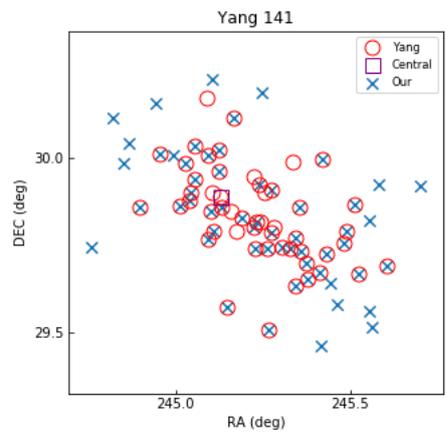
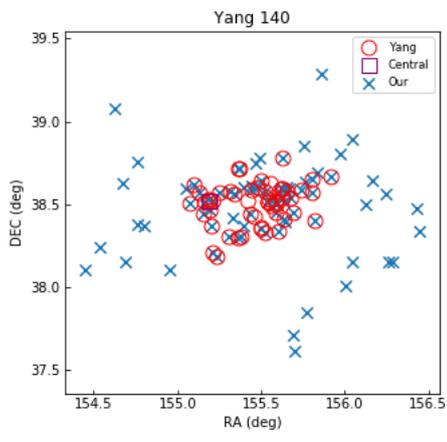


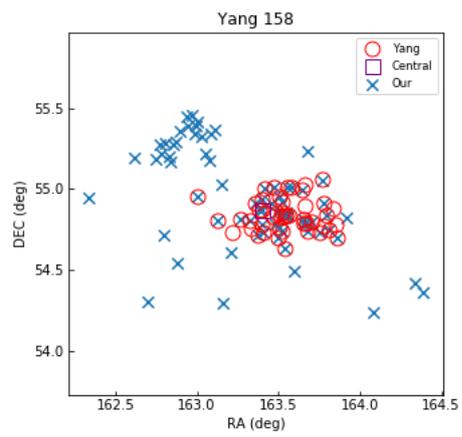
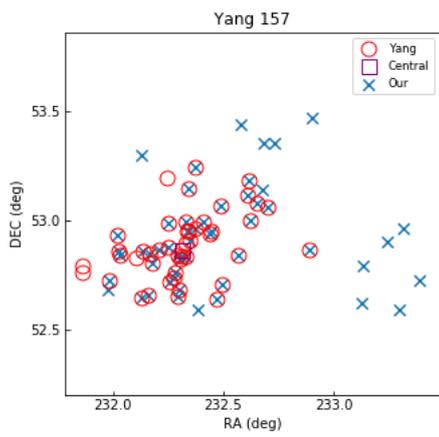
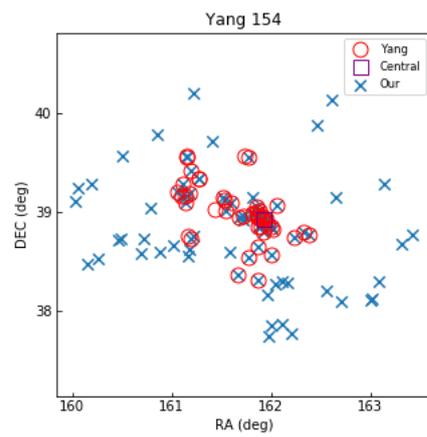
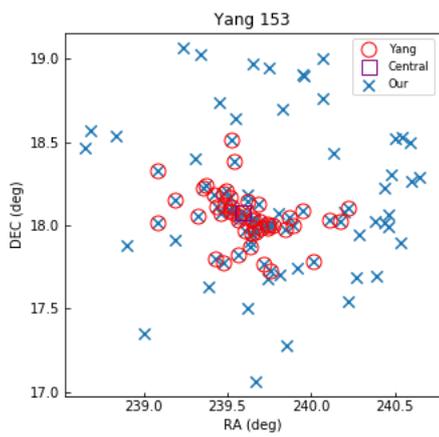
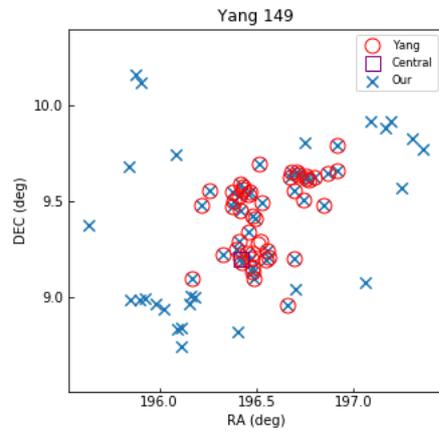
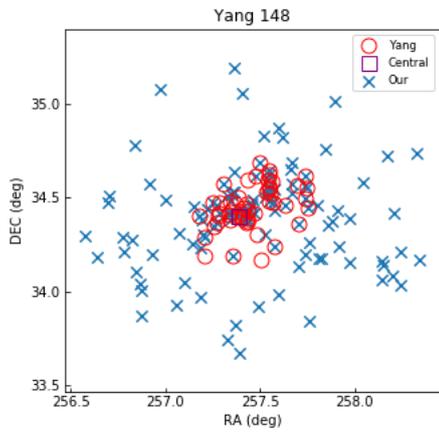


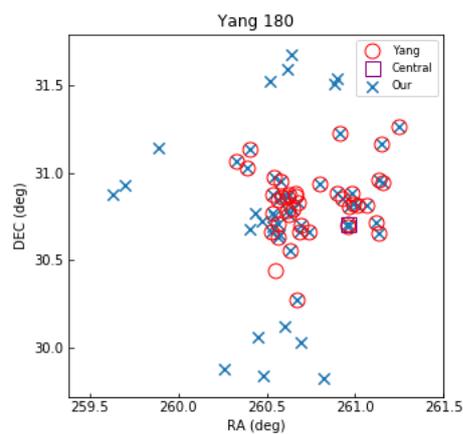
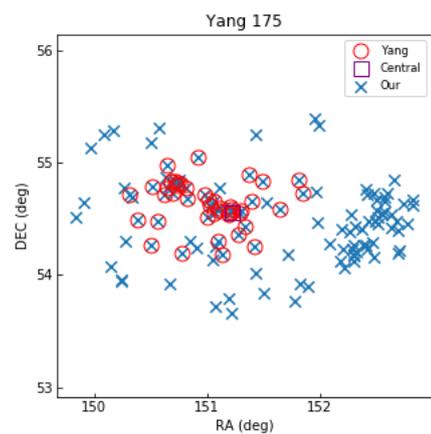
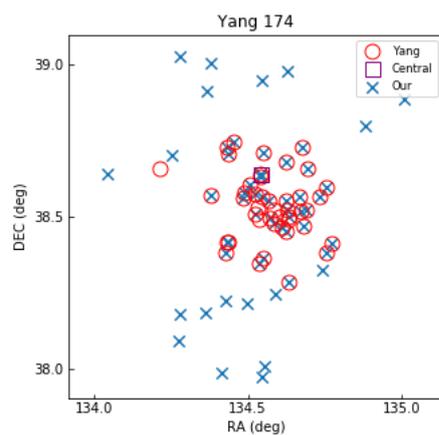
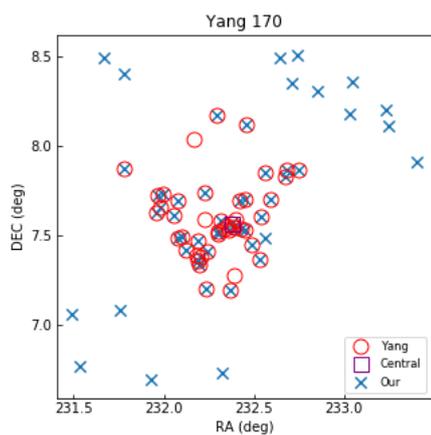
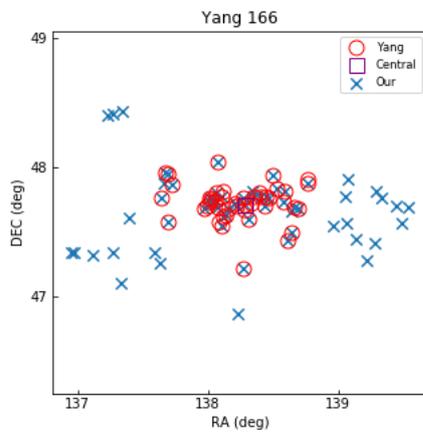
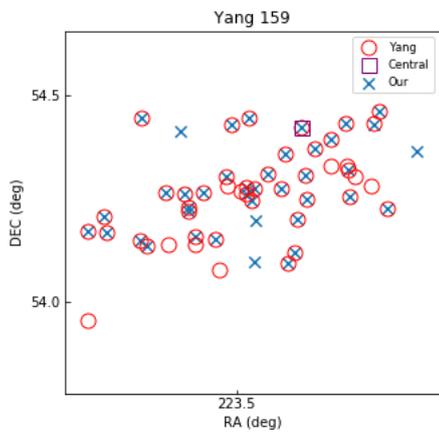


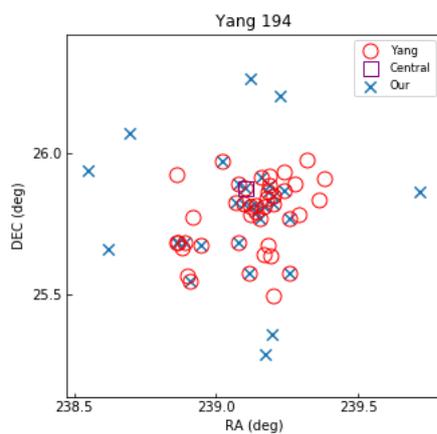
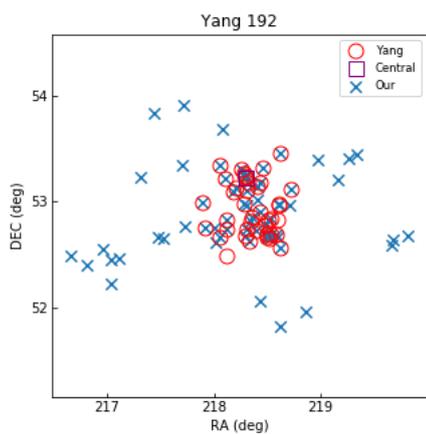
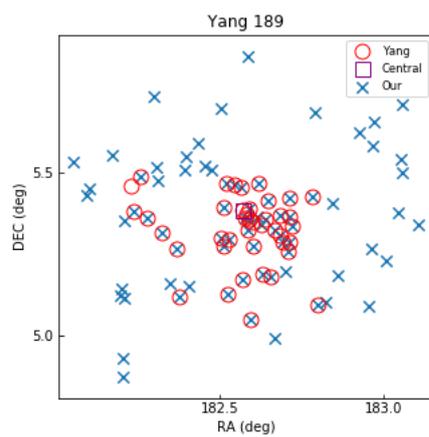
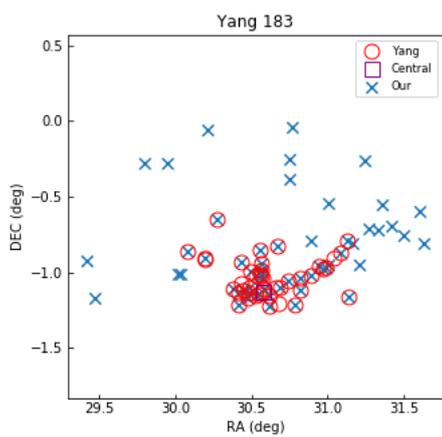
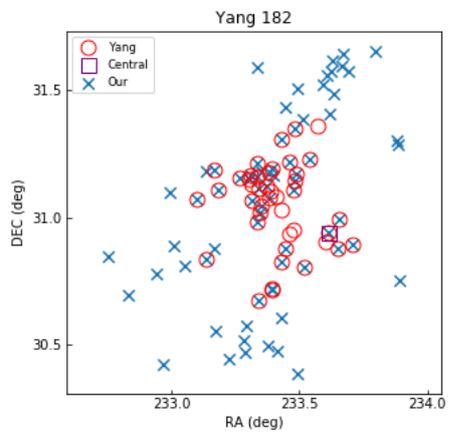
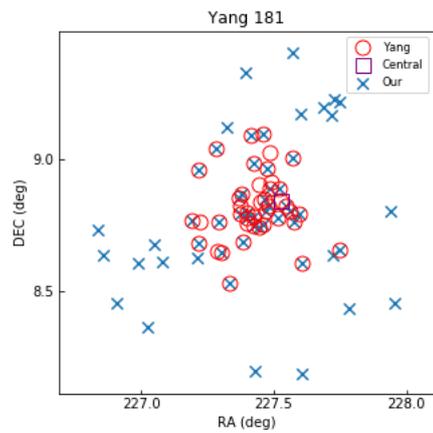


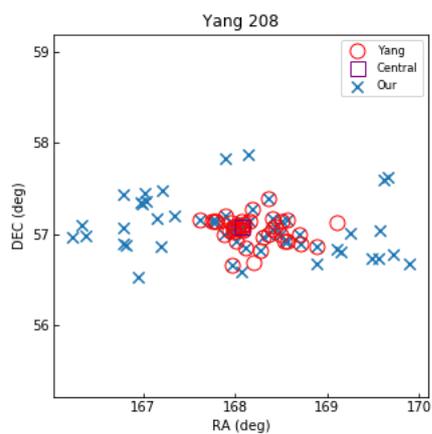
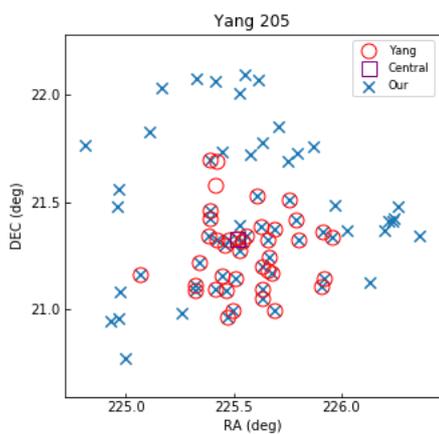
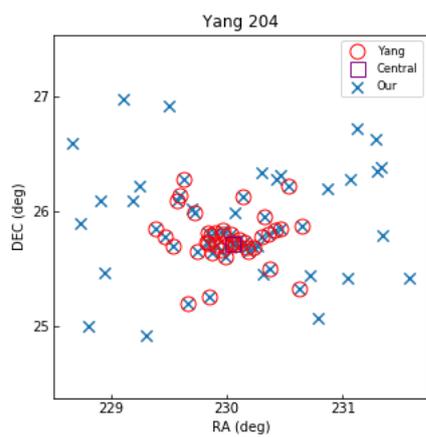
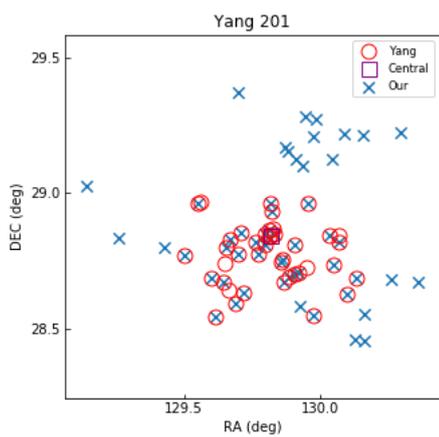
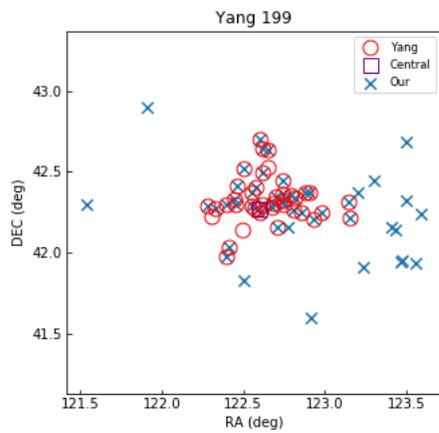
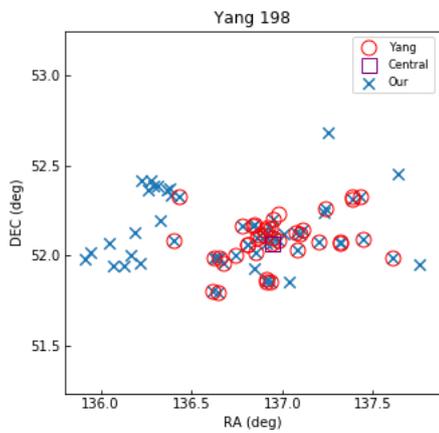


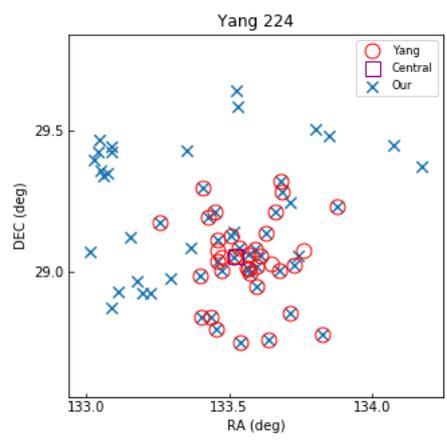
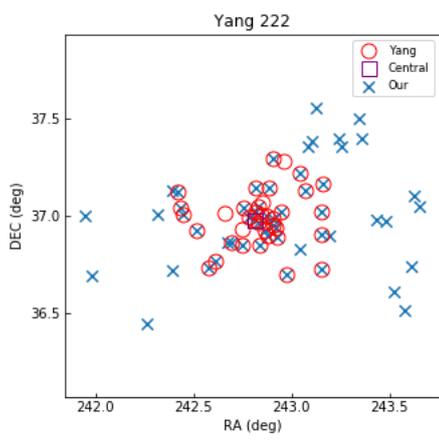
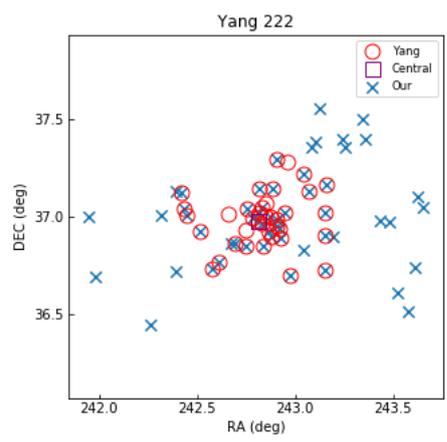
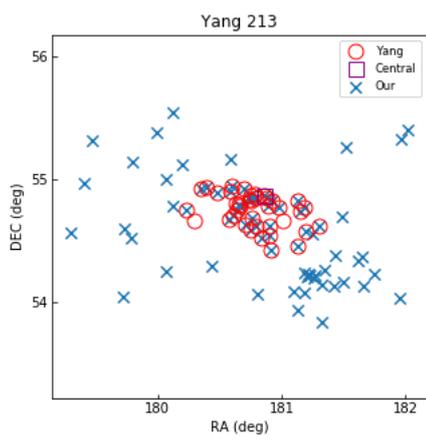
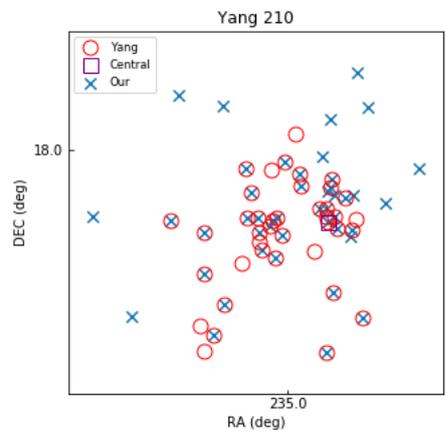
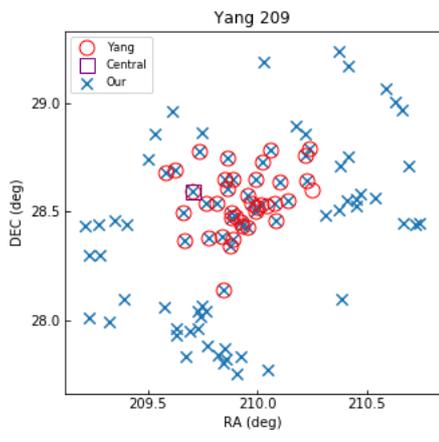


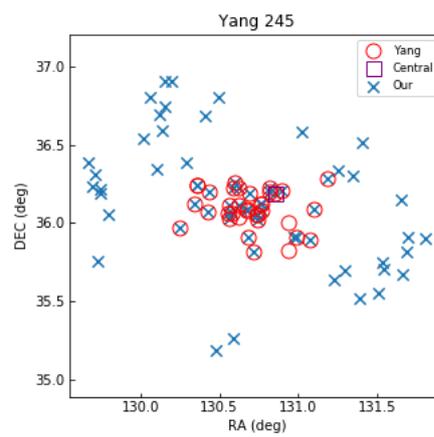
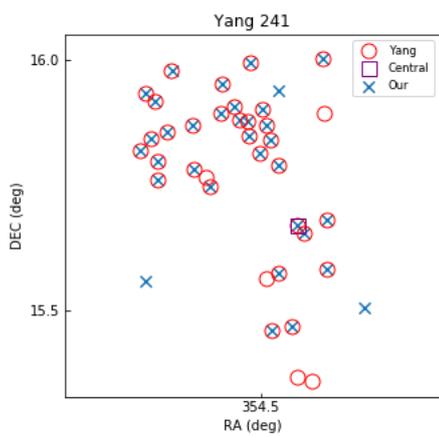
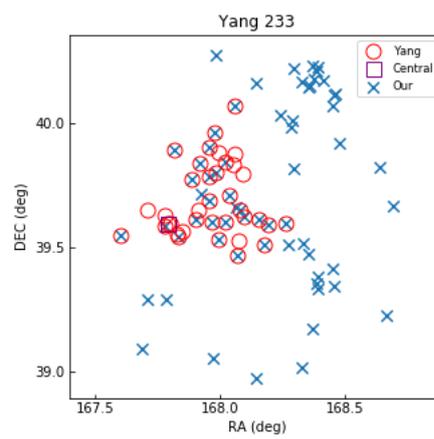
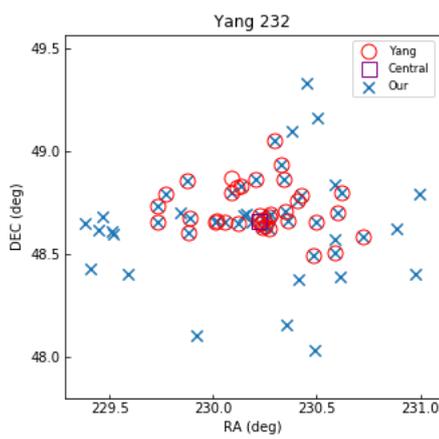
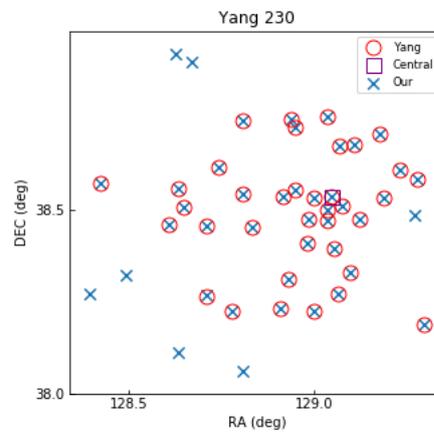


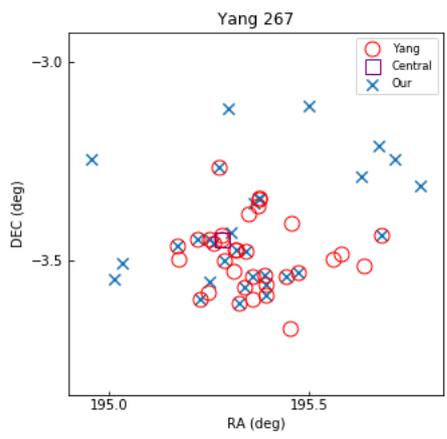
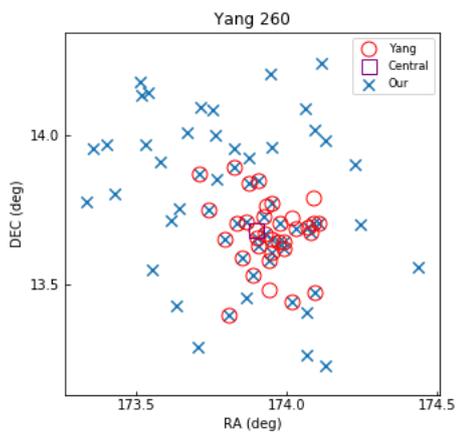
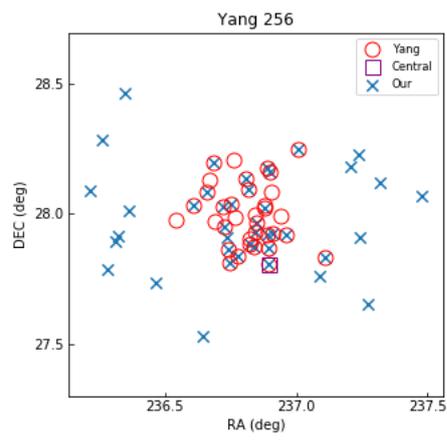
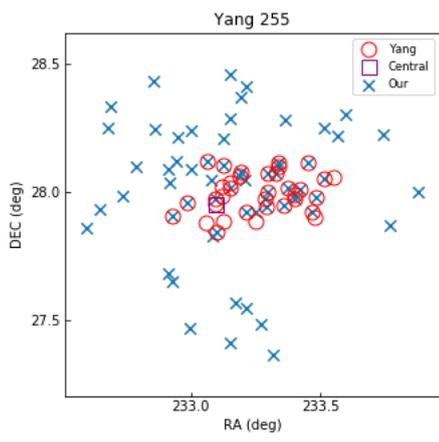
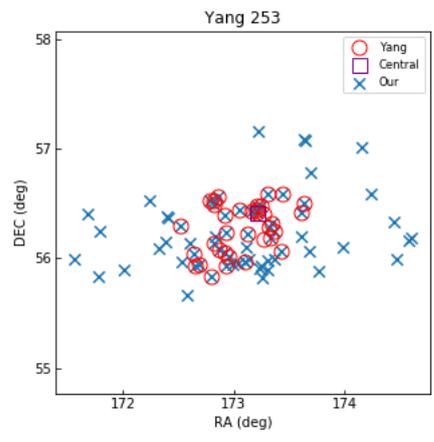
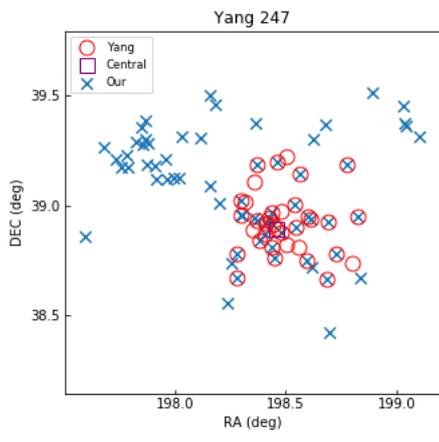


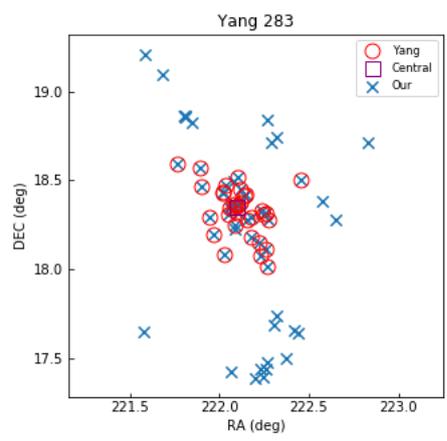
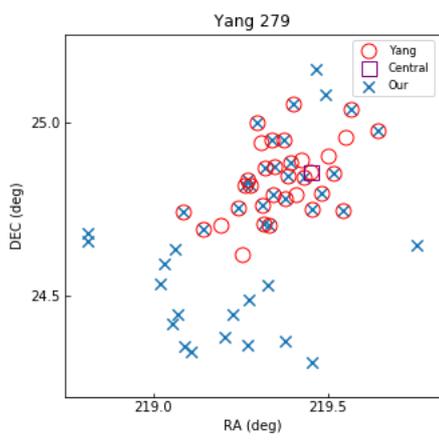
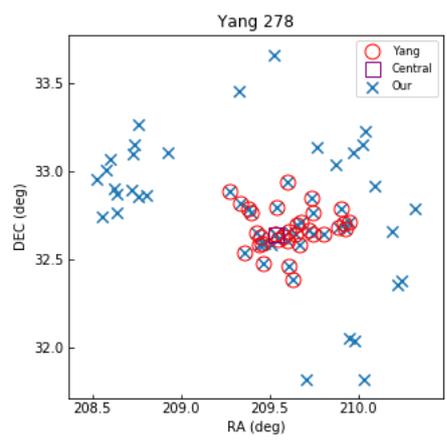
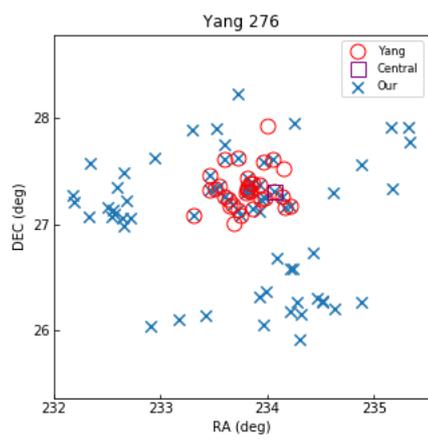
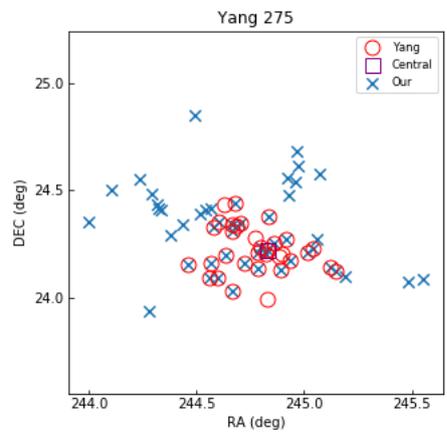
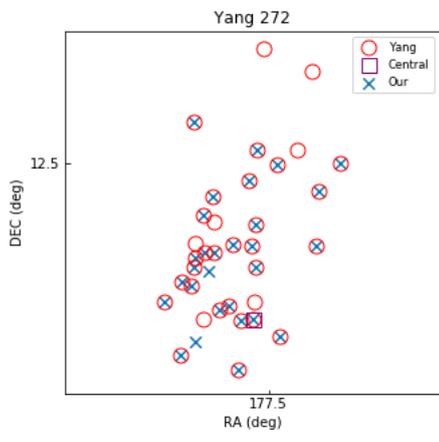


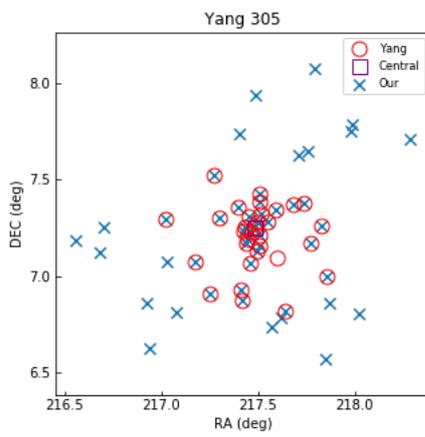
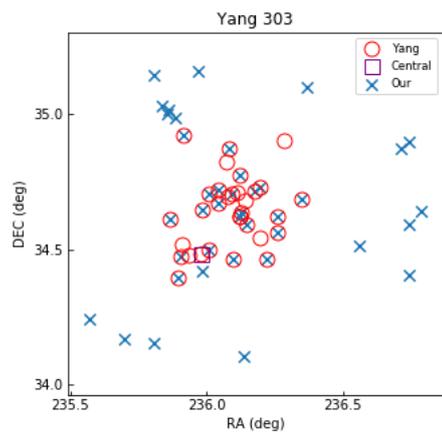
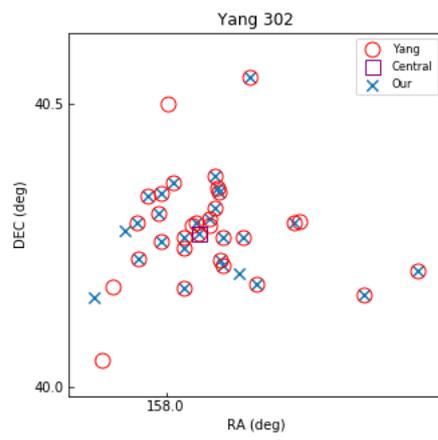
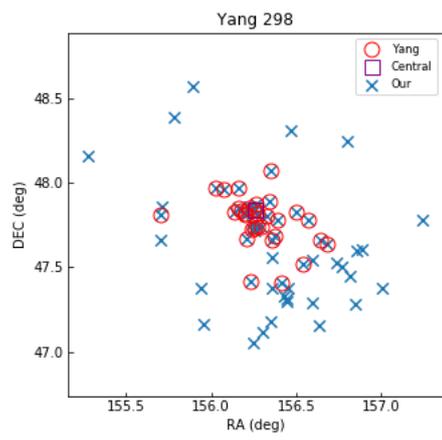
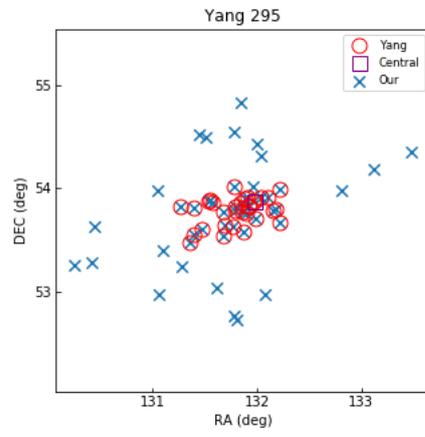
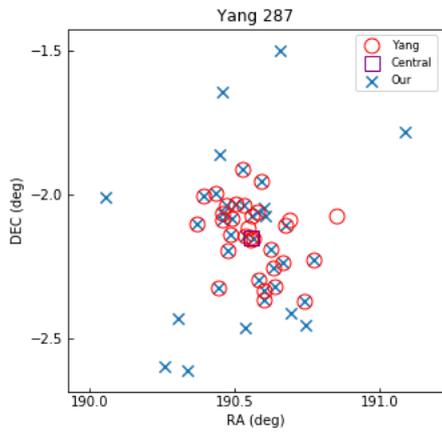


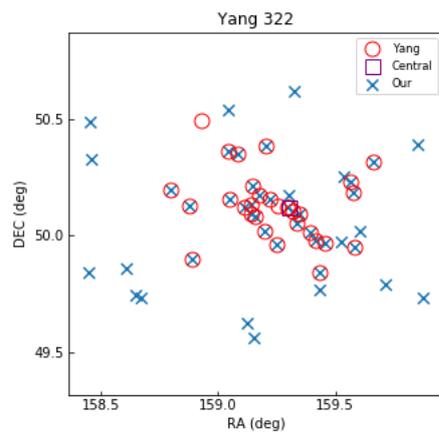
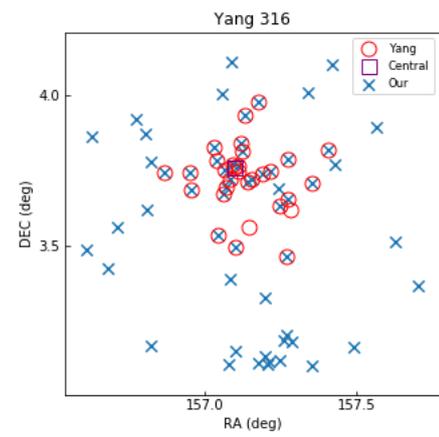
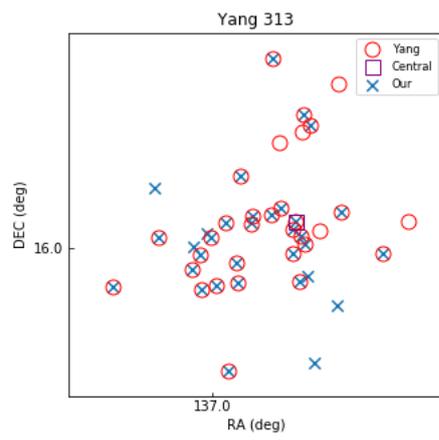
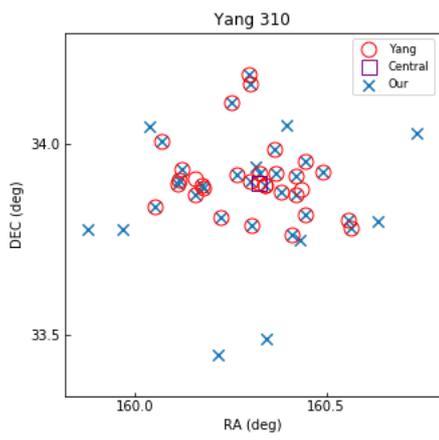
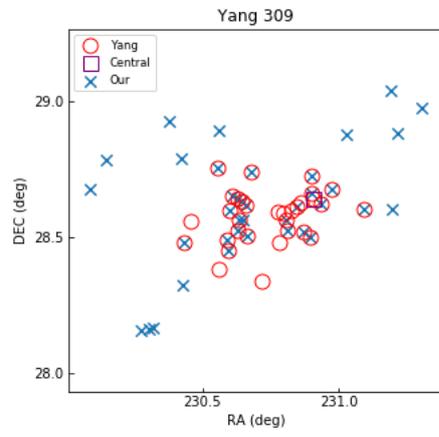
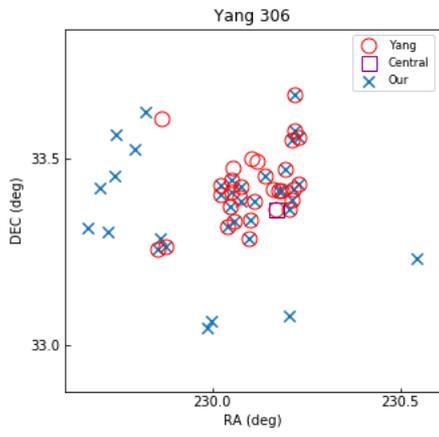


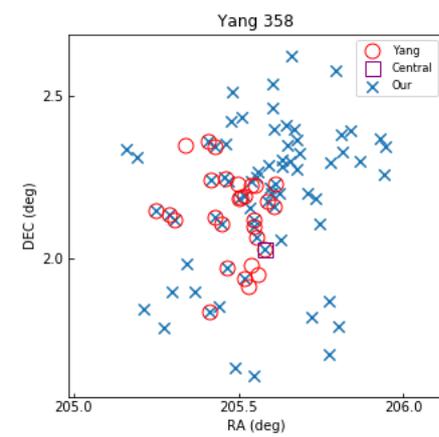
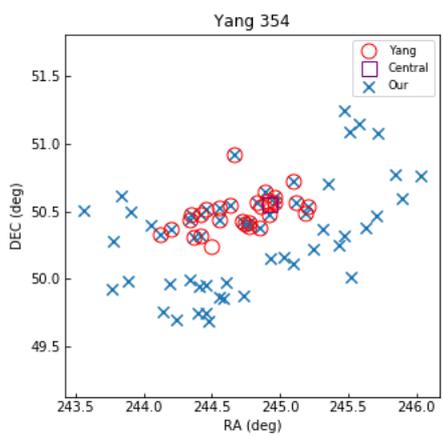
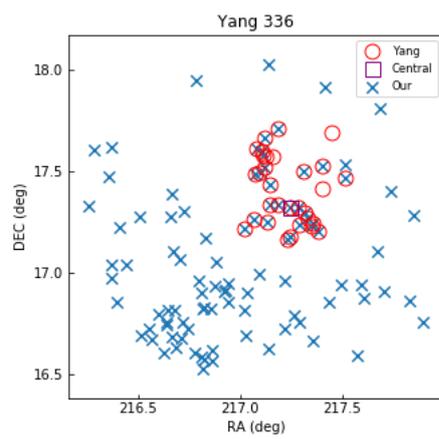
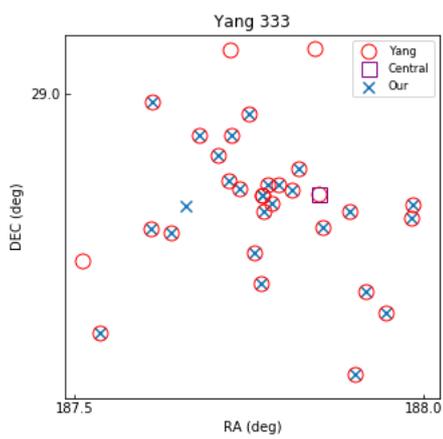
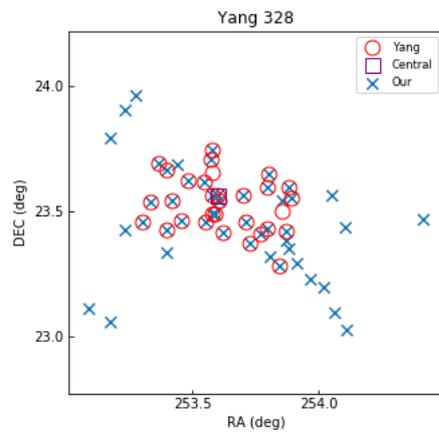
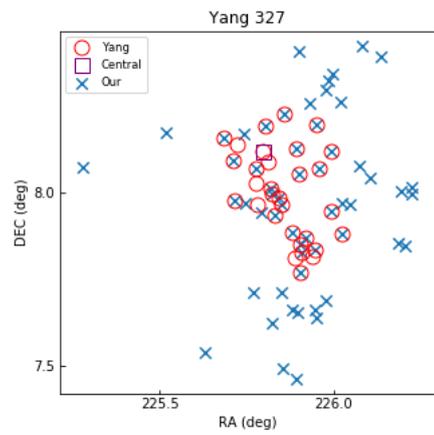


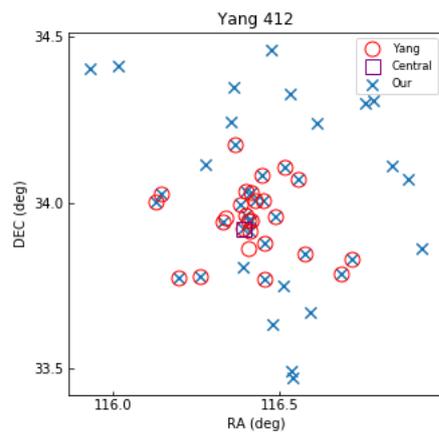
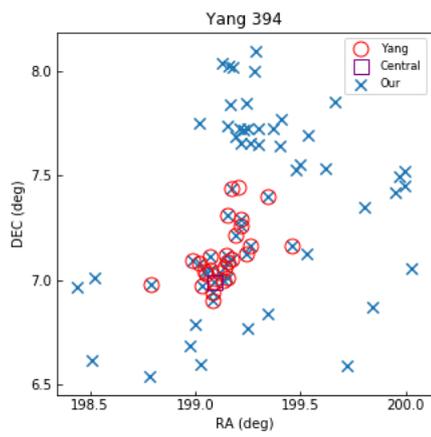
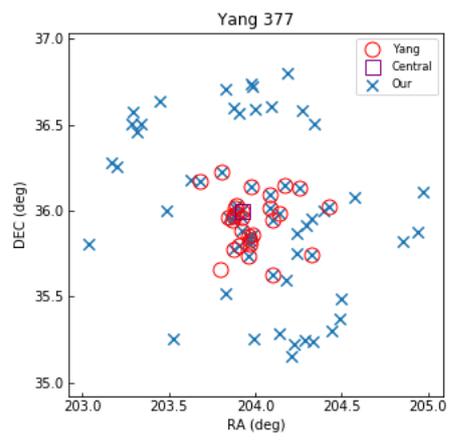
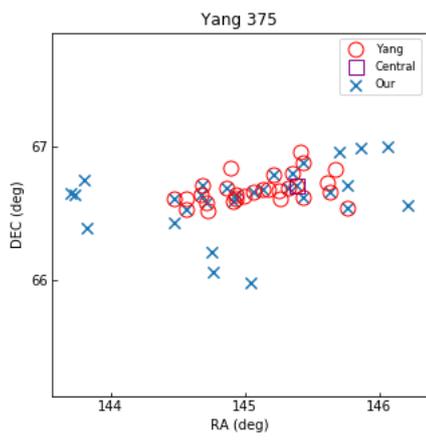
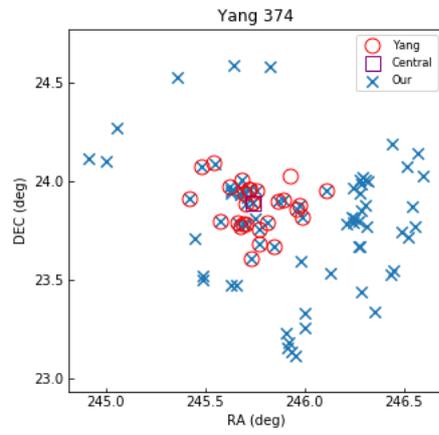
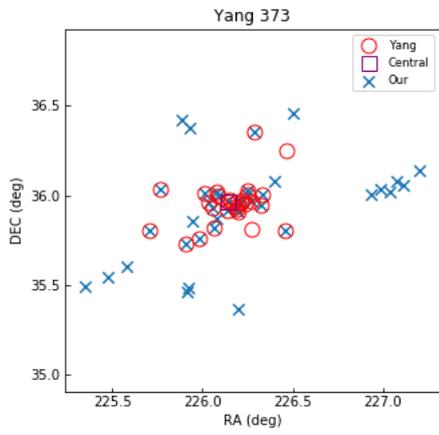


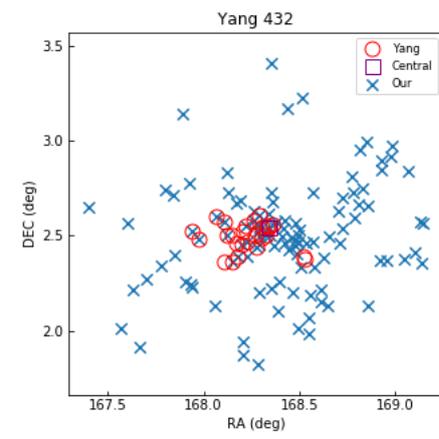
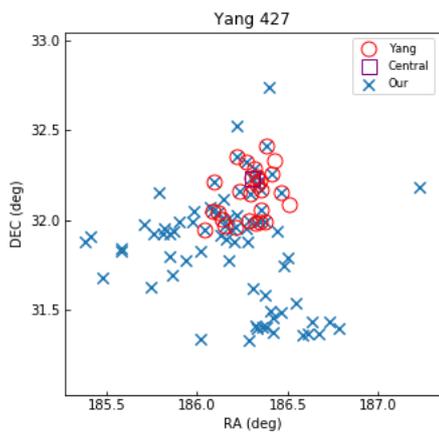
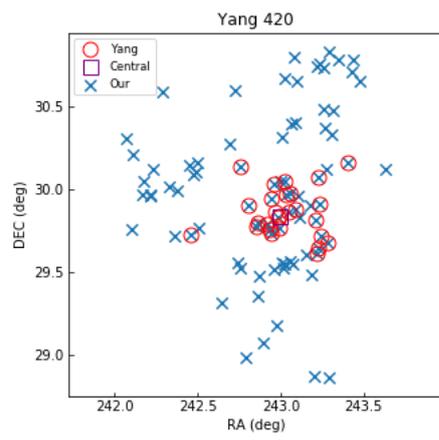
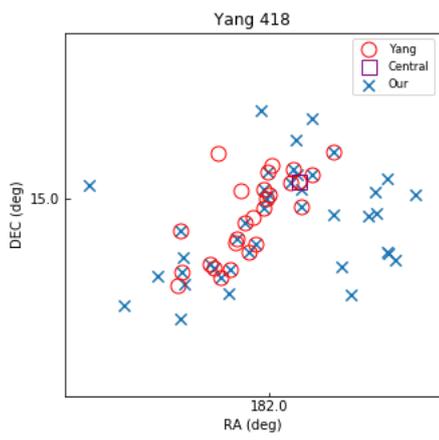
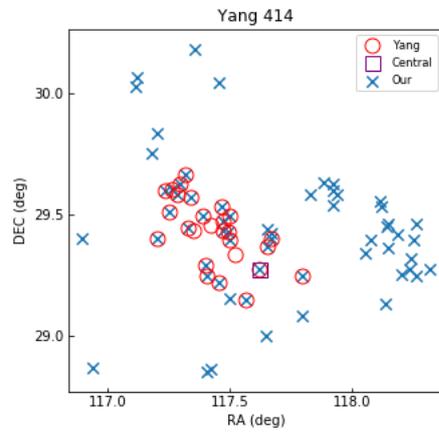
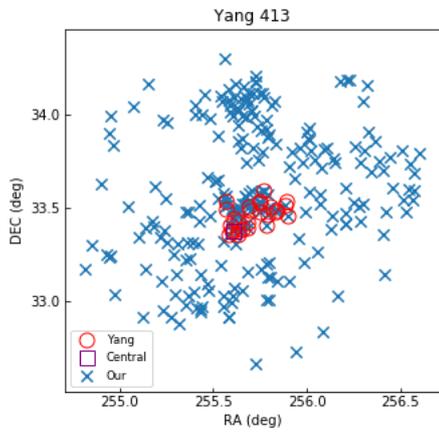


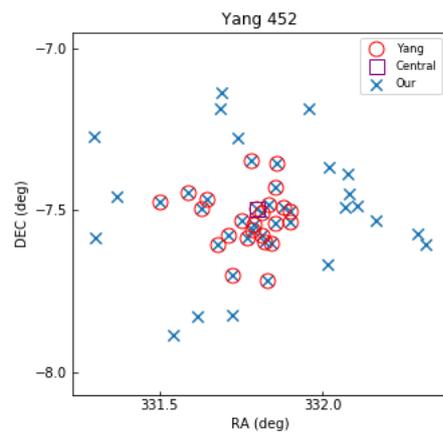
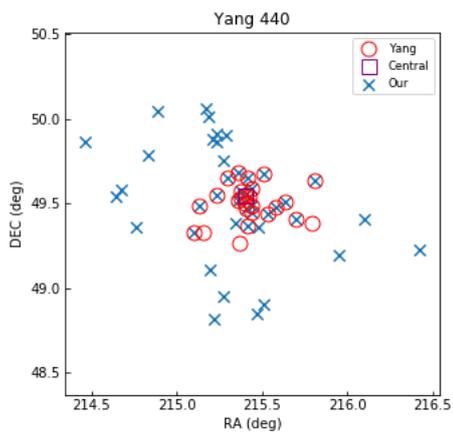
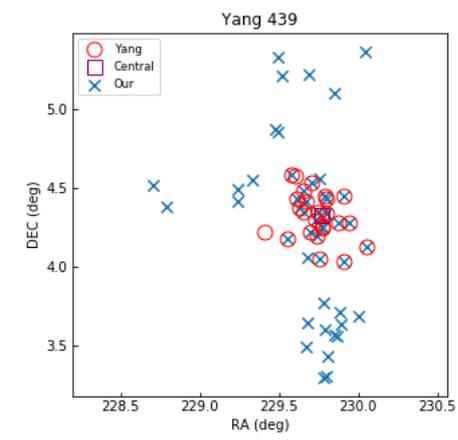
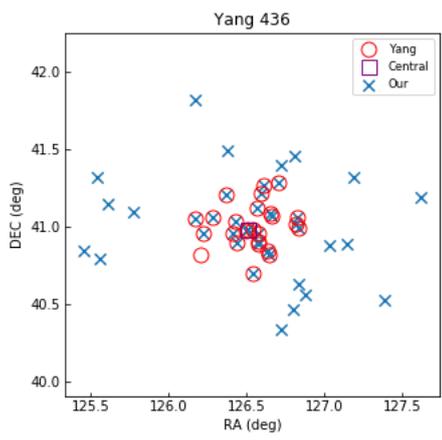
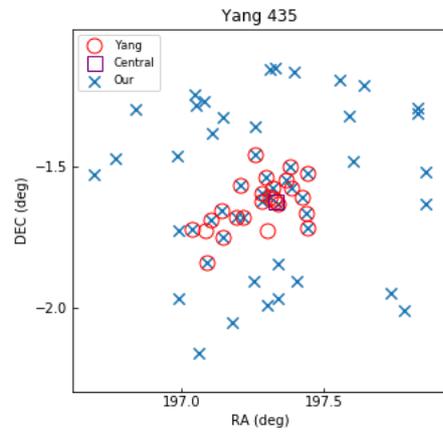
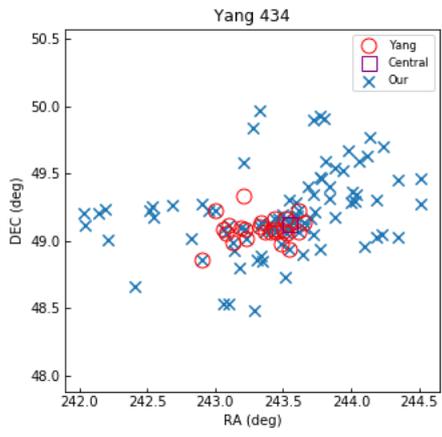


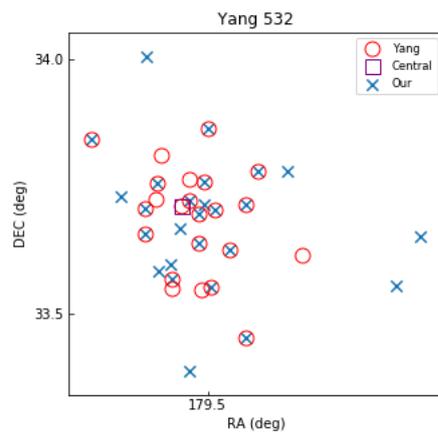
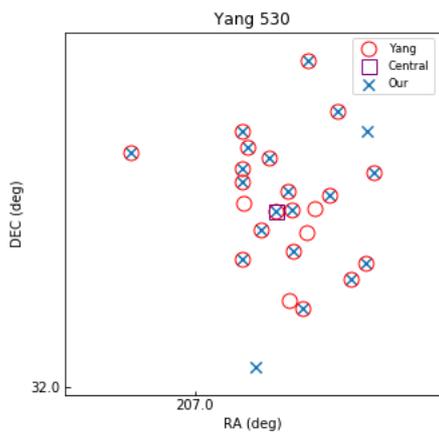
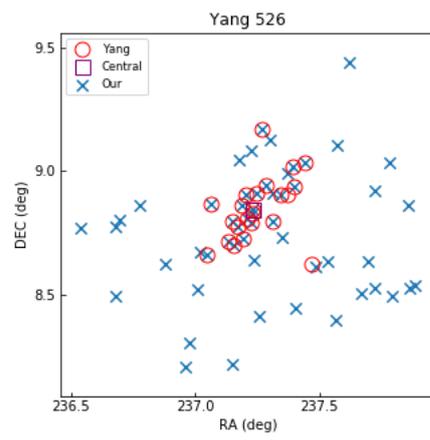
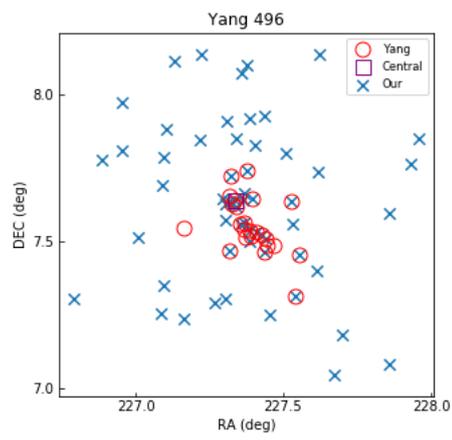
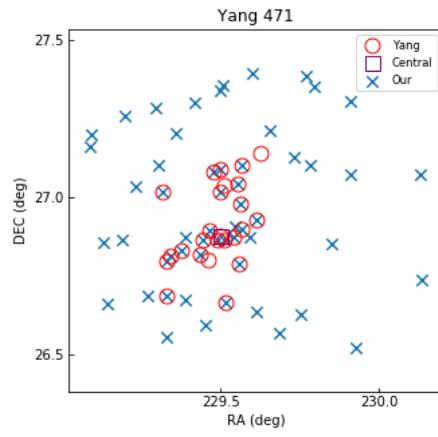
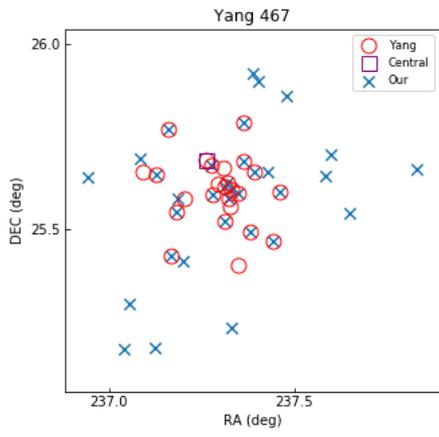


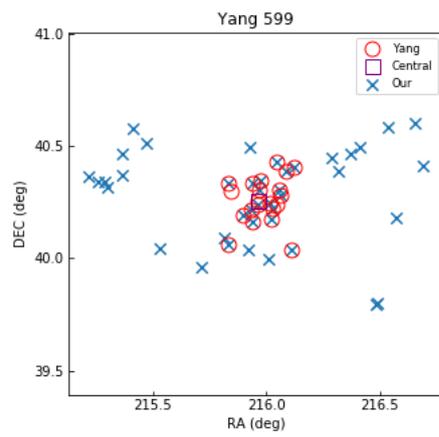
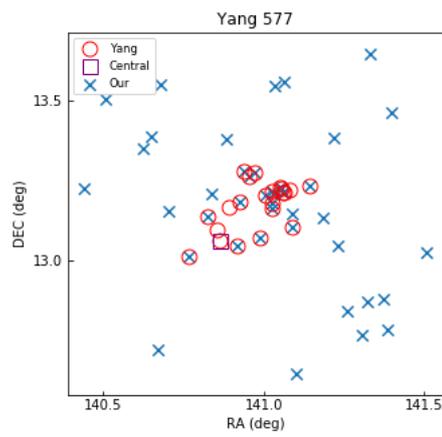
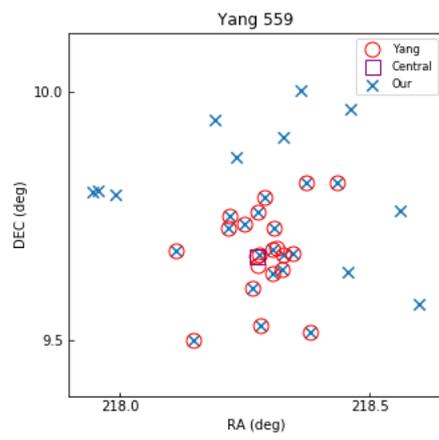
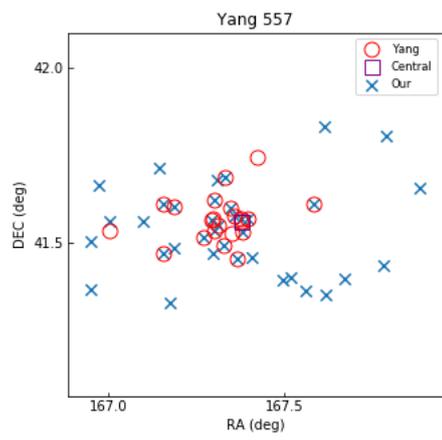
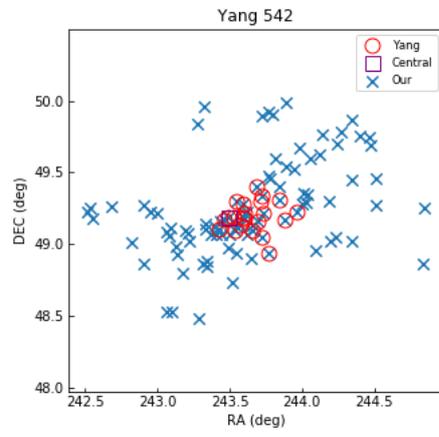
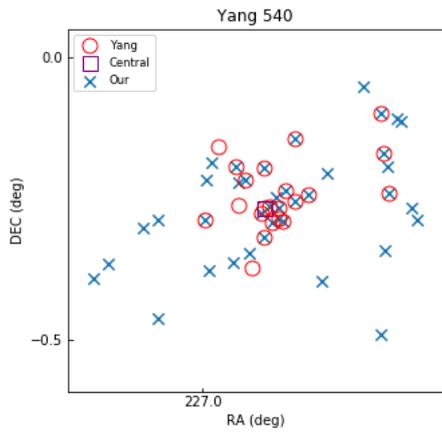


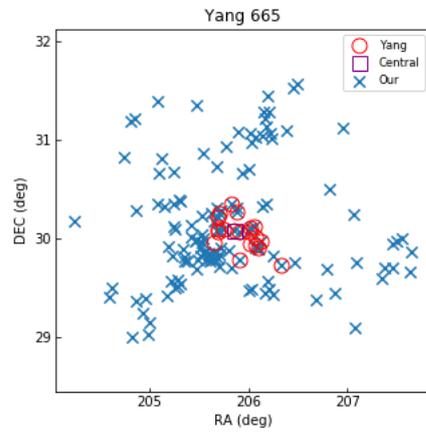
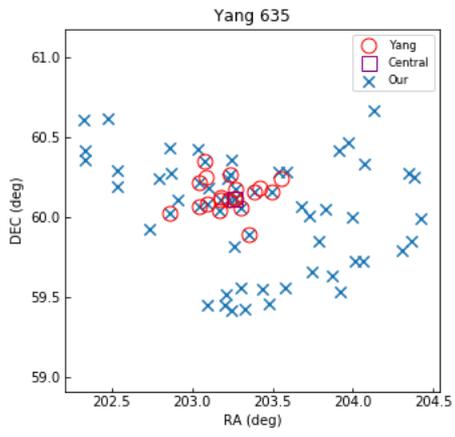
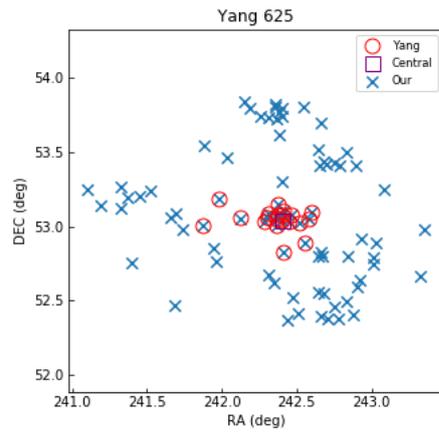
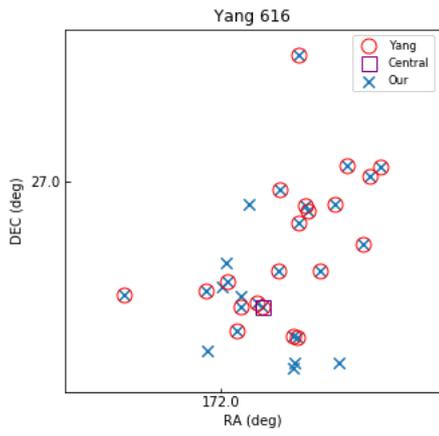












## APÊNDICE B - ANÁLISE DO ESPAÇO AR VS DEC DE AGLOMERADOS DA AMOSTRA 2

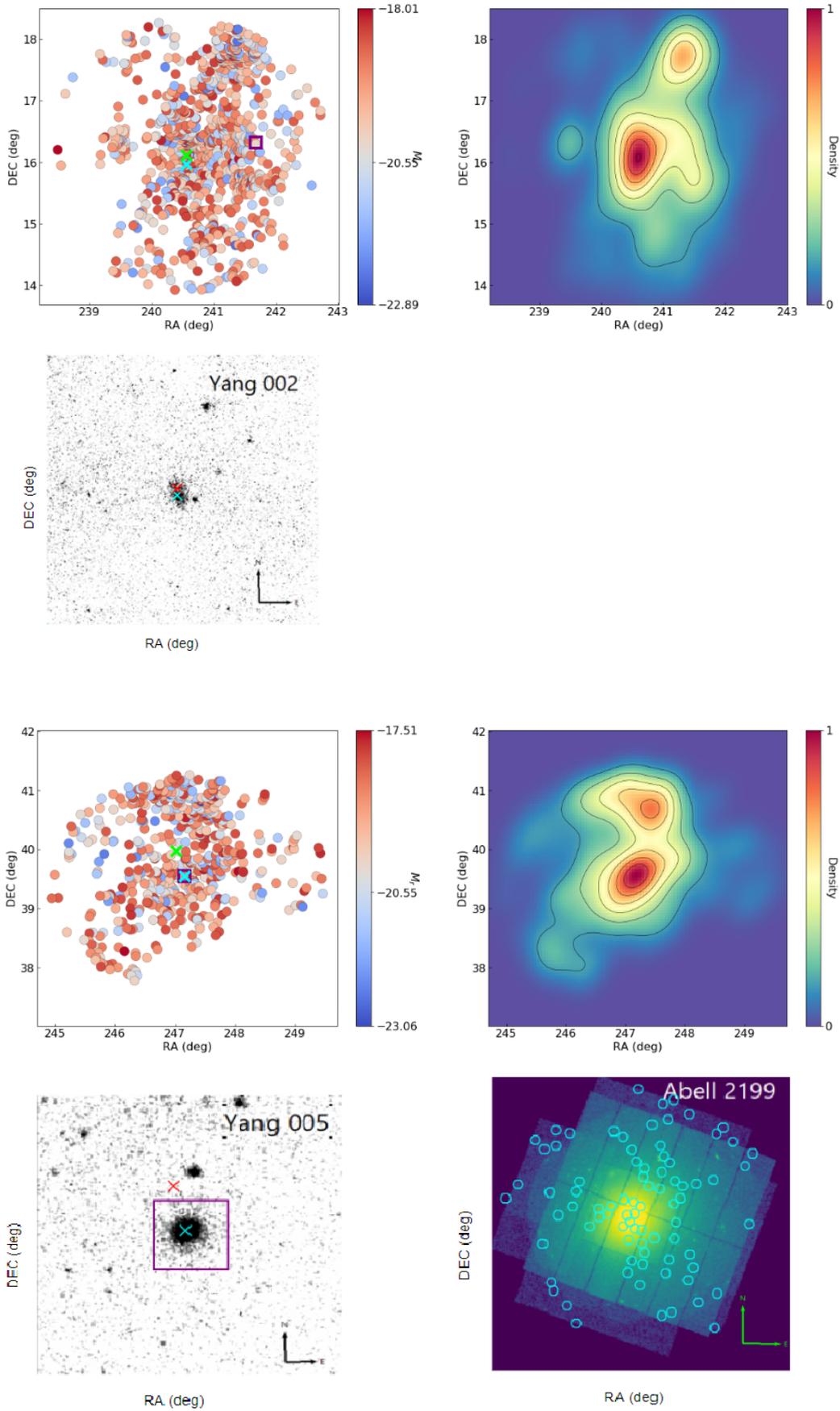
Neste apêndice apresentamos o estudo do espaço AR vs DEC dos aglomerados da Amostra 2, como mencionado no Capítulo 2. Todos são caracterizados por meio de 3 painéis e alguns possuem um painel adicional, relativo a observação do experimento XMM, quando disponível. Os painéis são construídos da seguinte forma:

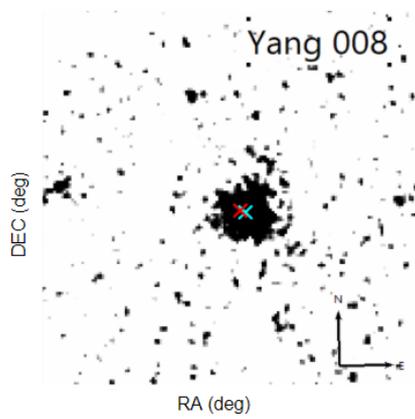
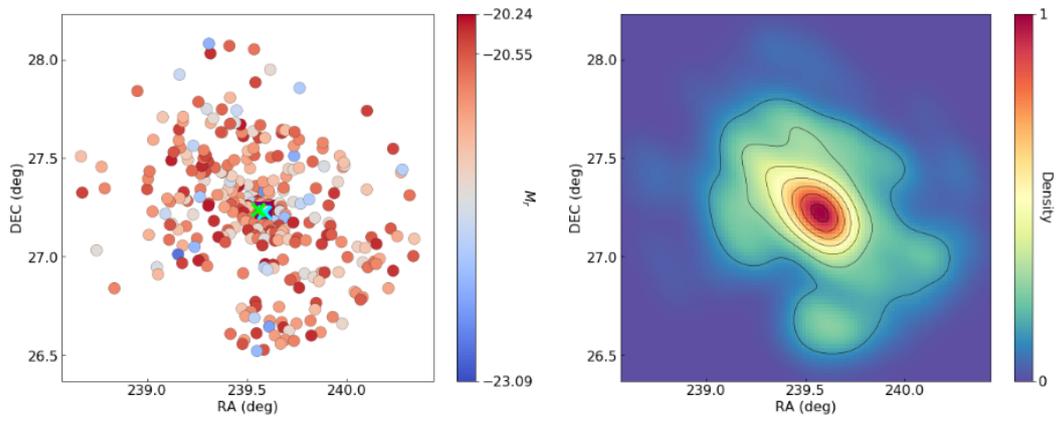
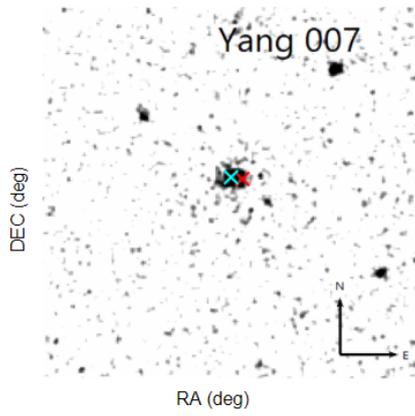
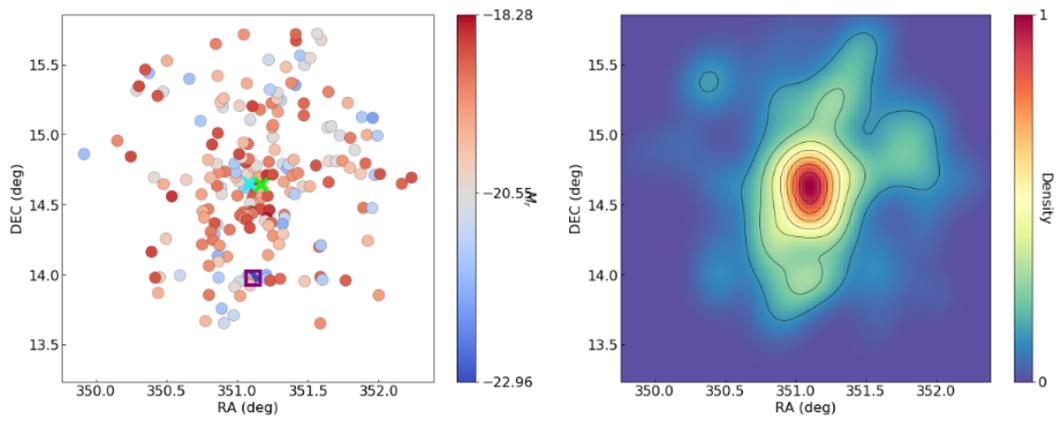
- Painel Superior Esquerdo: apresentamos as galáxias membro coloridas de acordo com sua respectiva magnitude absoluta, o centro óptico (x em verde), o centro em raios X (x em ciano) e a galáxia central (quadrado roxo). Como o intervalo de magnitude absoluta ( $M_r$ ) varia de acordo com o aglomerado, demarcamos na barra de cores os valores máximo, mínimo e -20.50, relativo ao limite de separação entre o regime de AF e BF utilizado neste trabalho.
- Painel Superior Direito: um mapa de densidade de galáxias membro, feito por meio de uma estimativa de densidade que utiliza kernel gaussiano, com largura de banda 0.3<sup>1</sup>. Para possibilitar uma intercomparação entre aglomerados quanto a ocupação do espaço AR vs DEC normalizamos a densidade para o intervalo [0,1].
- Painel Inferior Esquerdo: observação proveniente do levantamento ROSAT do aglomerado, ocupando exatamente a mesma área do painel superior esquerdo. Nesse caso picos de emissão são representados por tons mais próximos do preto. O centro óptico é destacado com um x em vermelho e o centro em raios X com um x em ciano.
- Painel Inferior Direito: observação em raios X feita pelo experimento XMM-Newton, quando disponível. Os círculos cianos representam as galáxias membro do aglomerado. A área ocupada pela observação é demarcada por um quadrado roxo no painel inferior esquerdo. Excepcionalmente no caso de Yang 023 encontramos duas observações relevantes, resultando em um painel extra, totalizando 5 painéis.

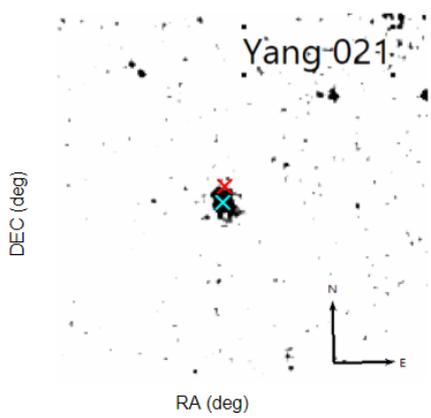
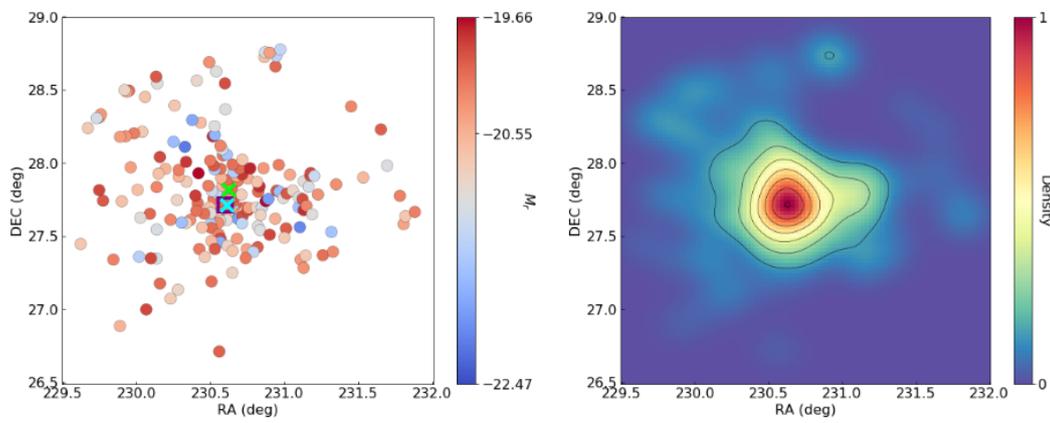
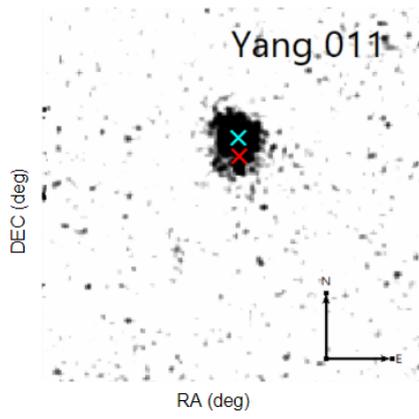
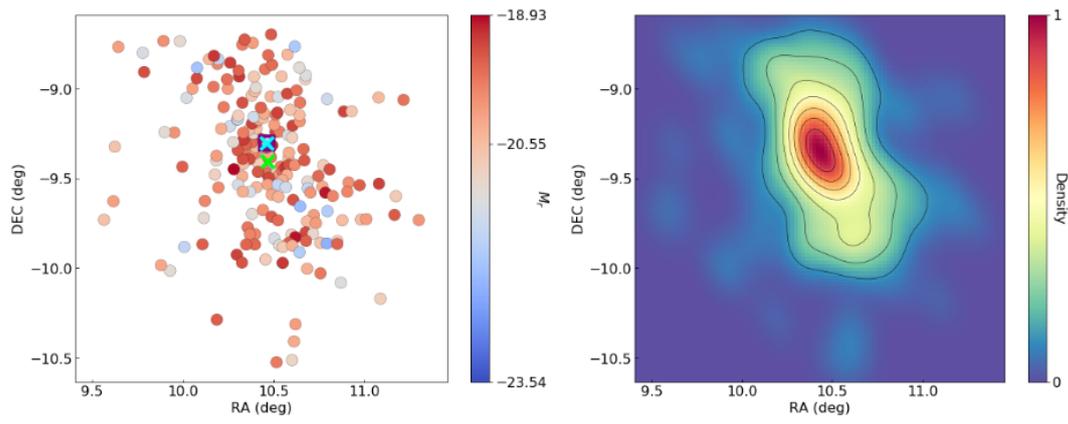
---

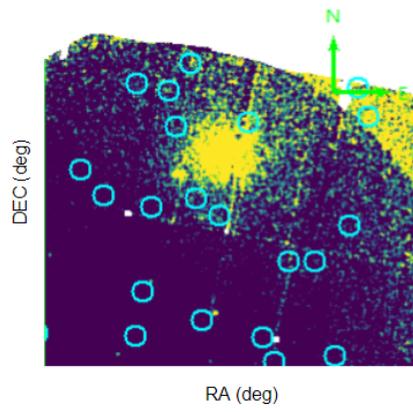
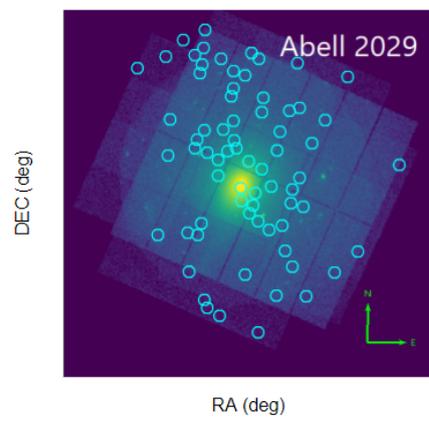
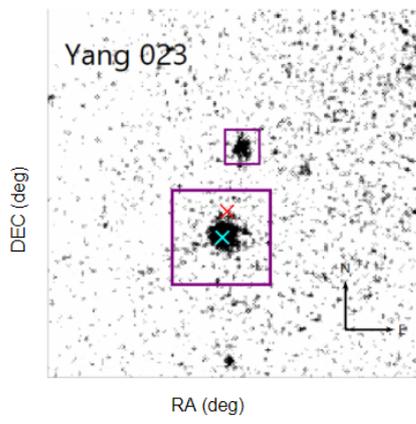
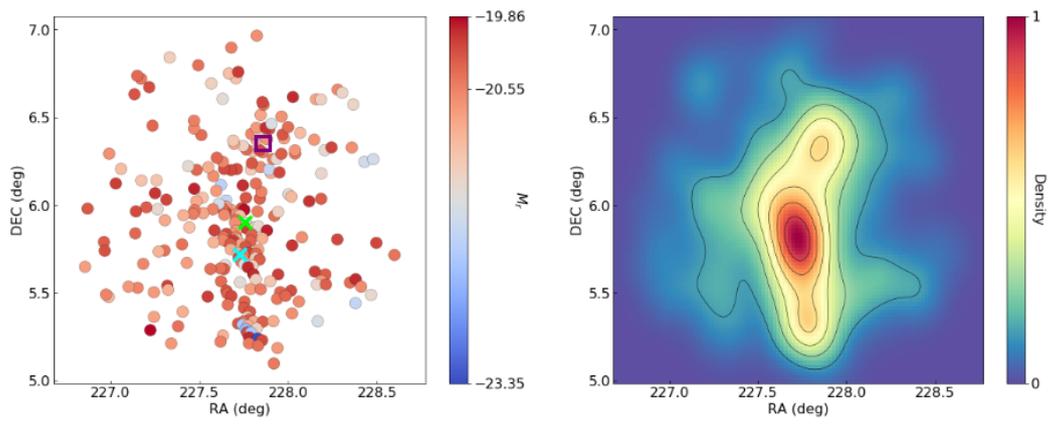
<sup>1</sup>o valor de largura de banda foi definido empiricamente.

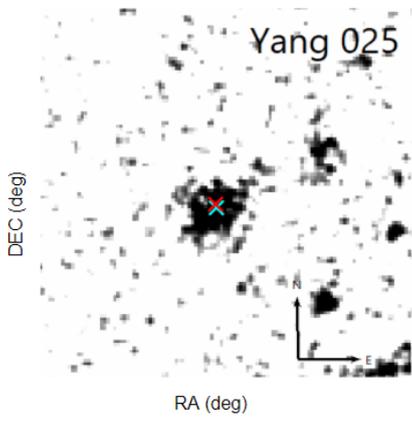
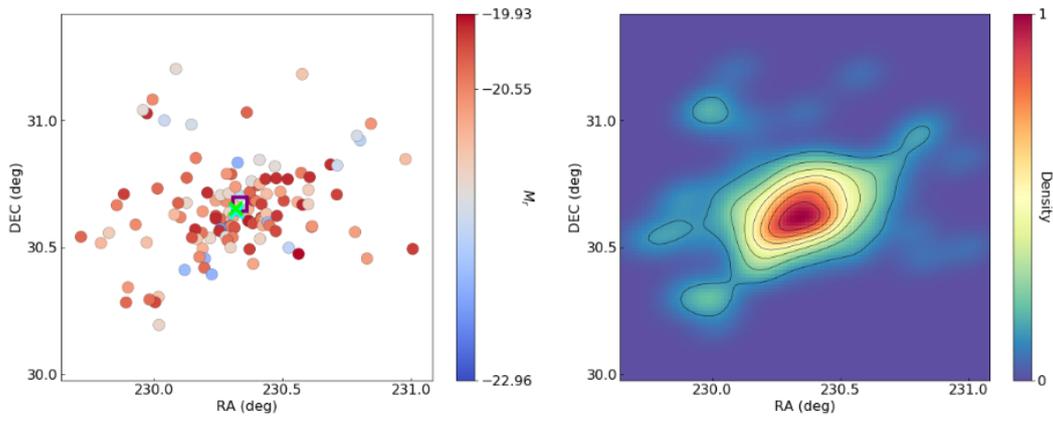
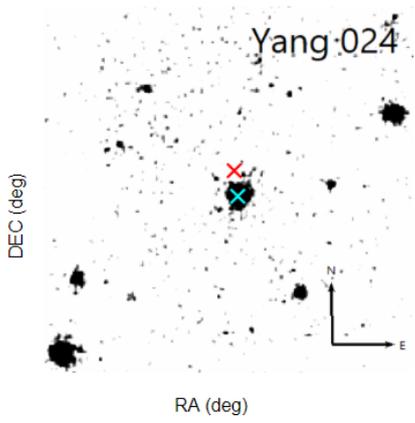
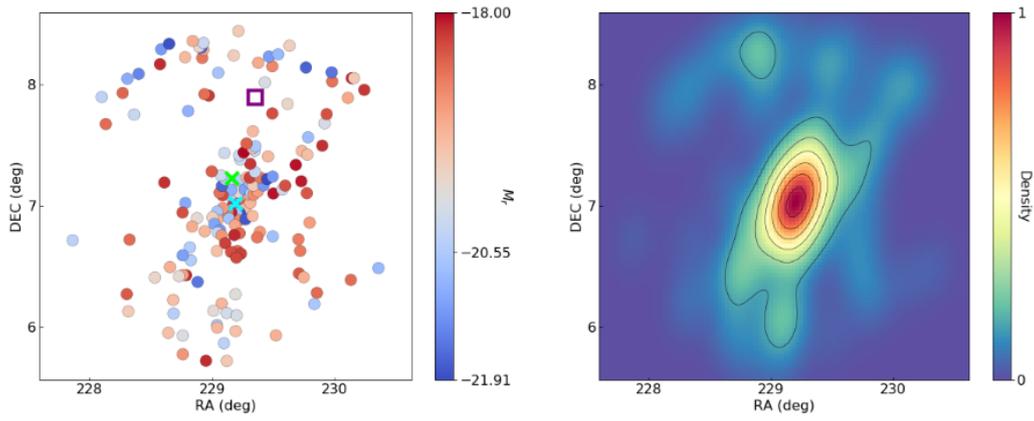
Figura B.1 - Análise do espaço AR vs DEC dos aglomerados da amostra 2.

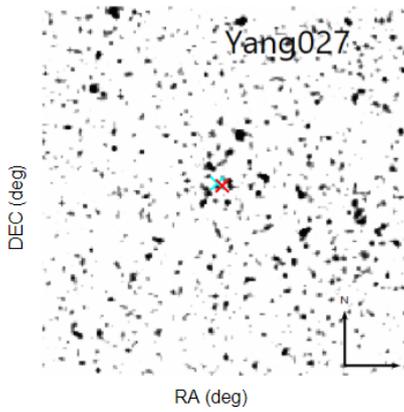
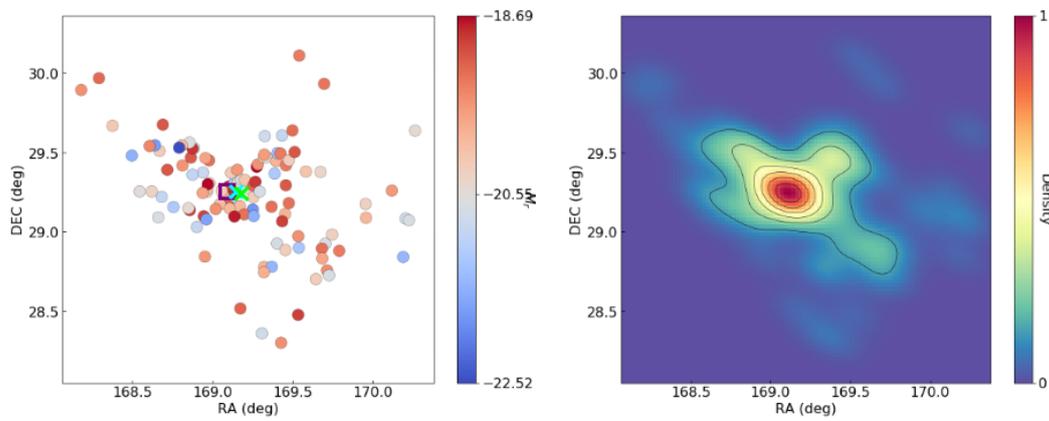
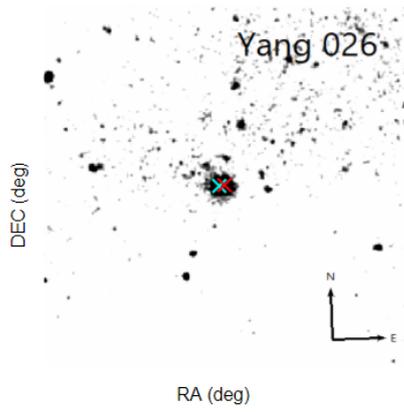
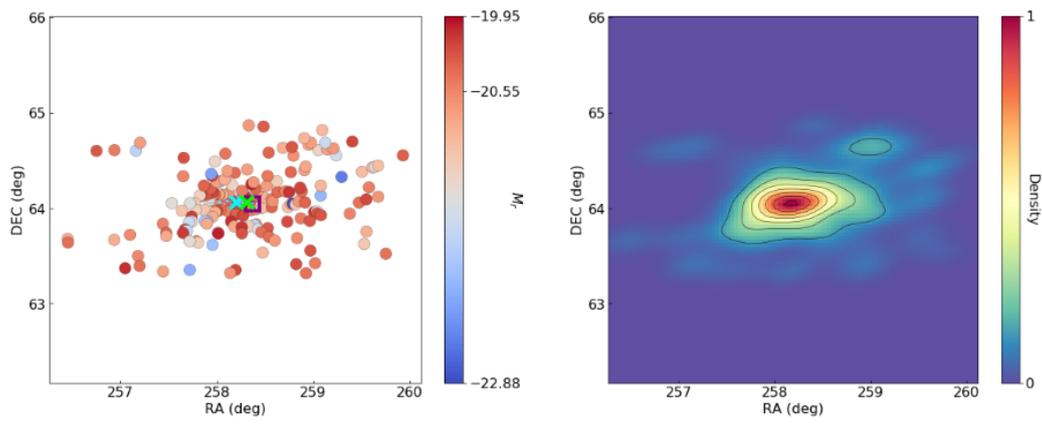


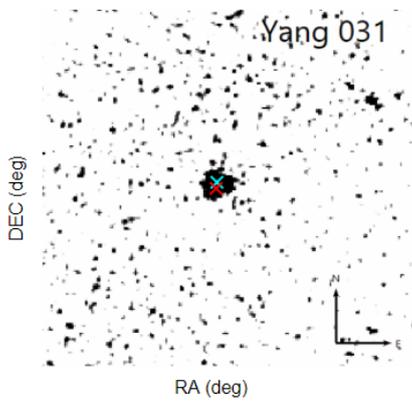
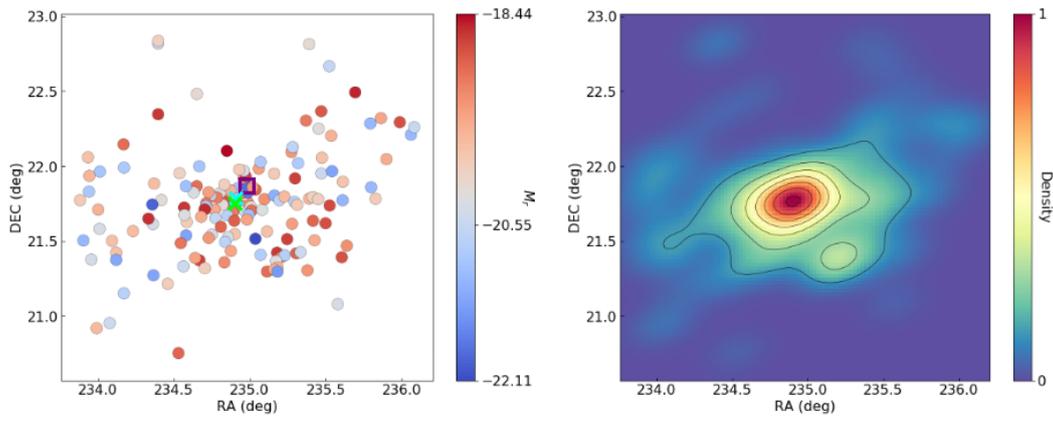
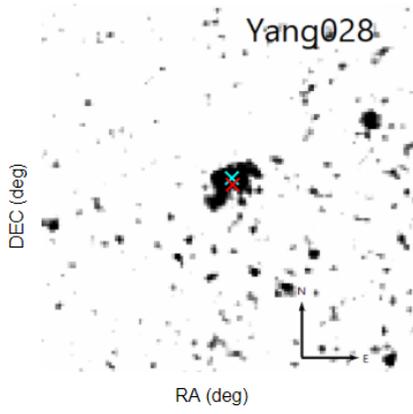
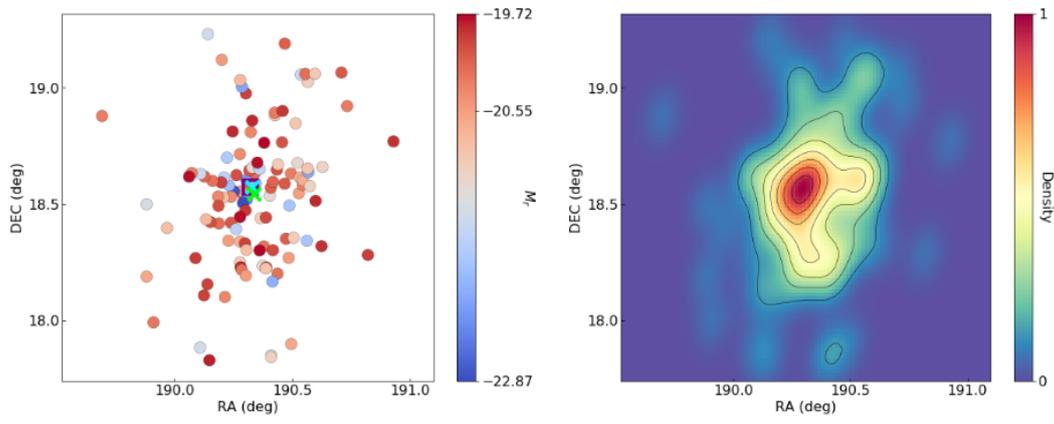


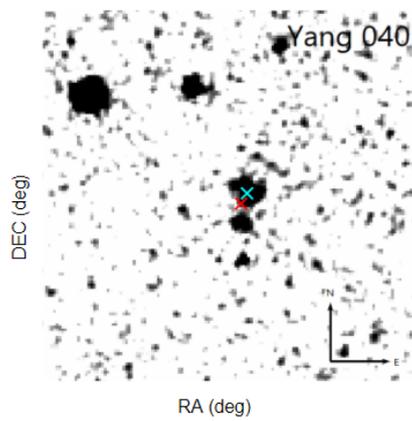
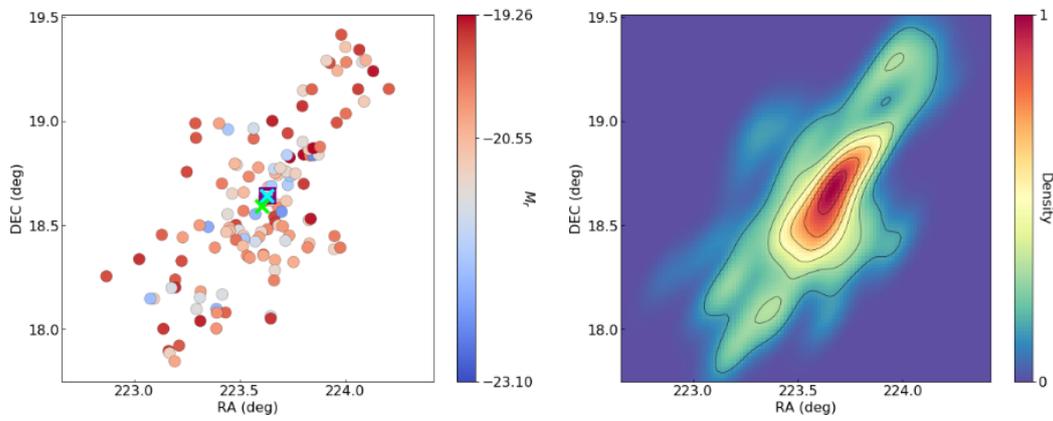
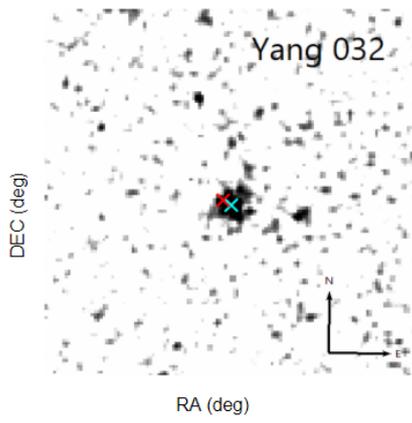
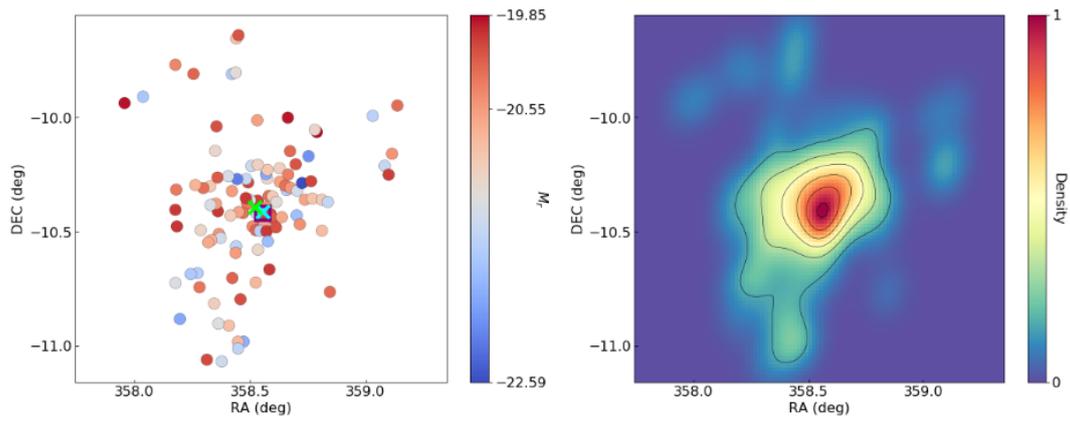


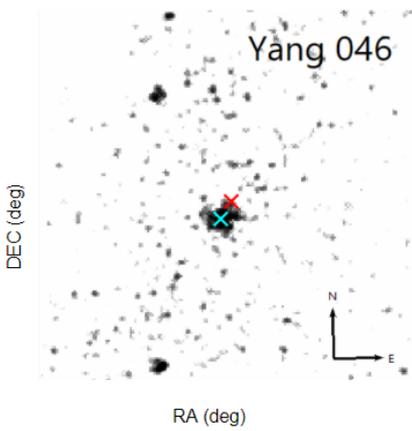
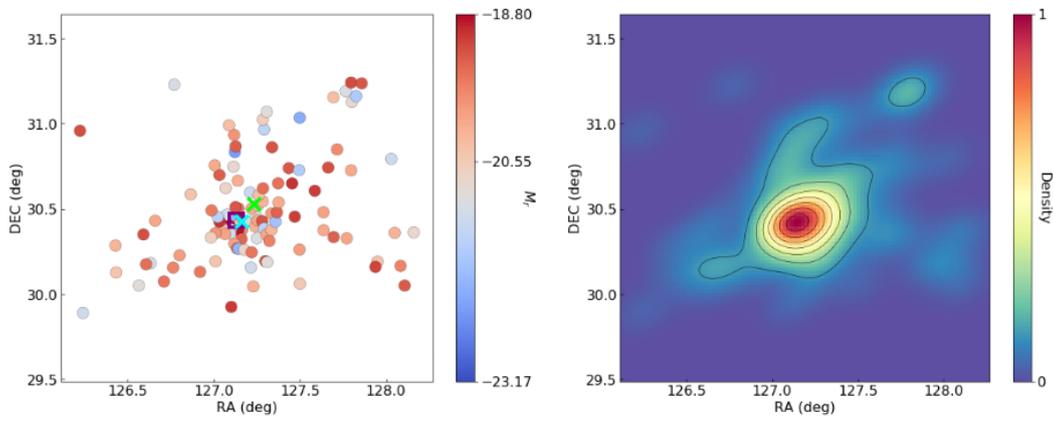
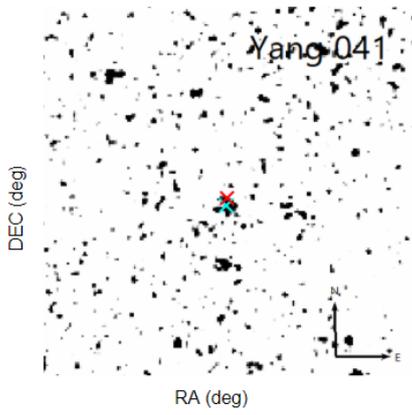
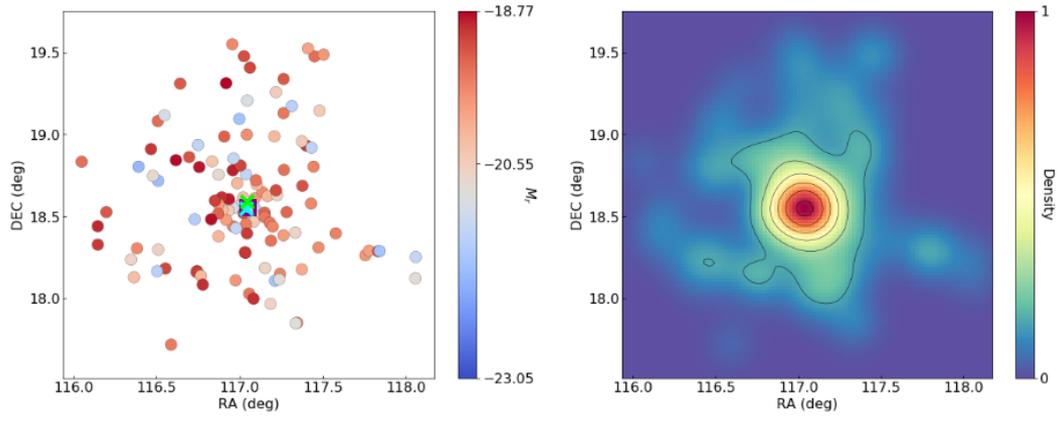


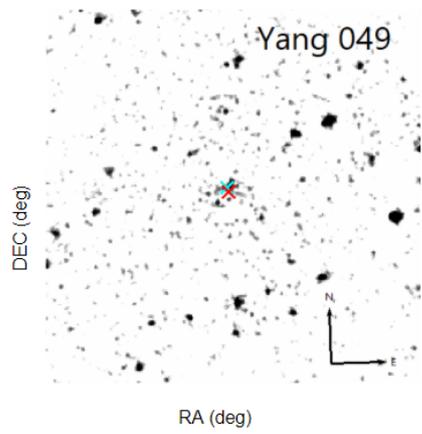
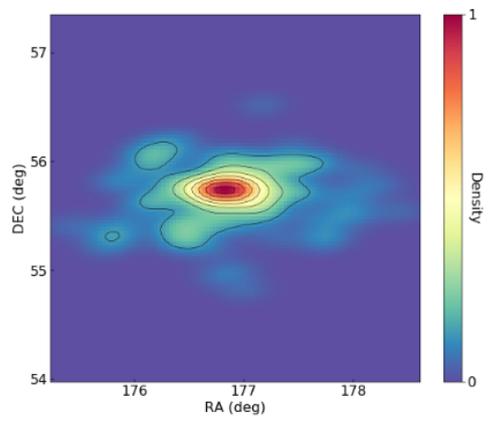
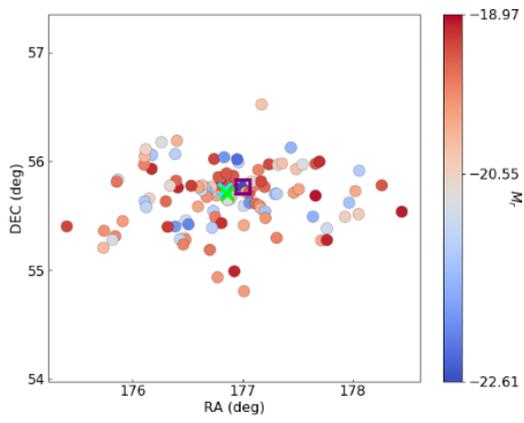
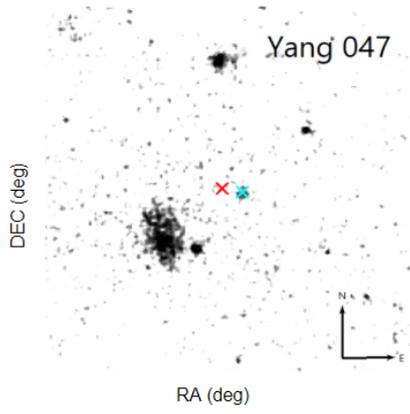
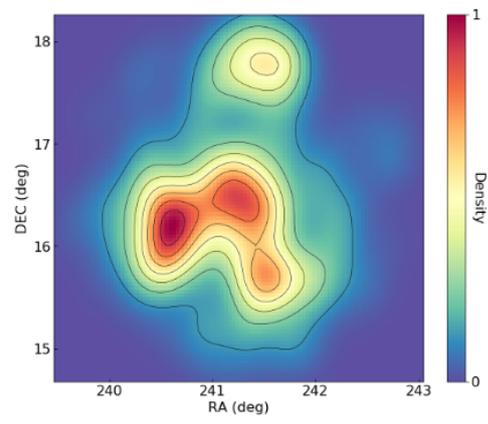
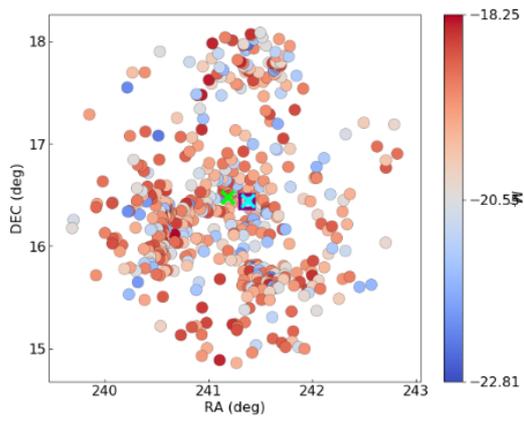


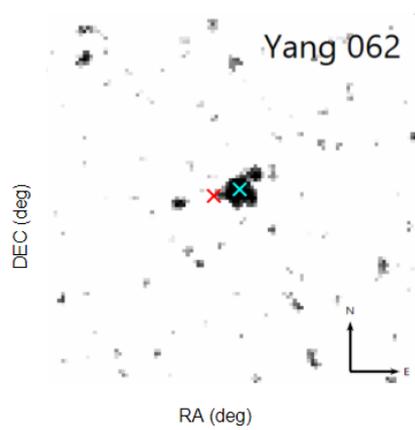
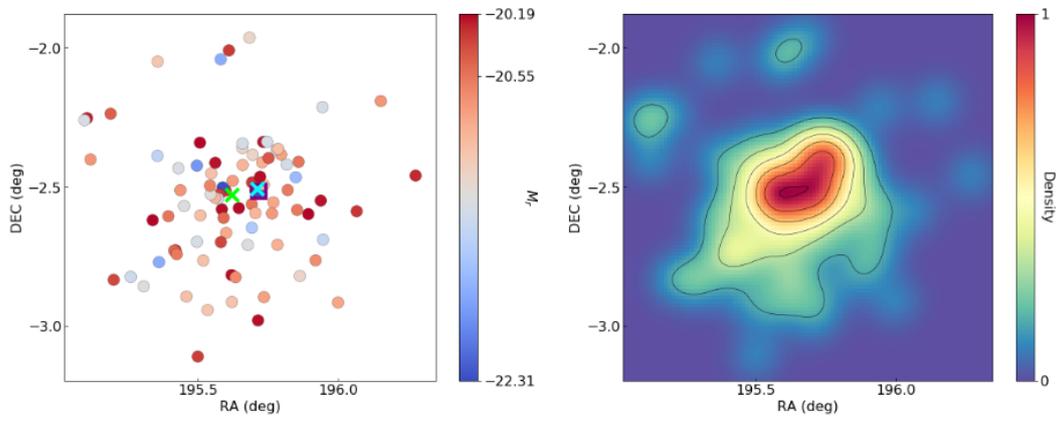
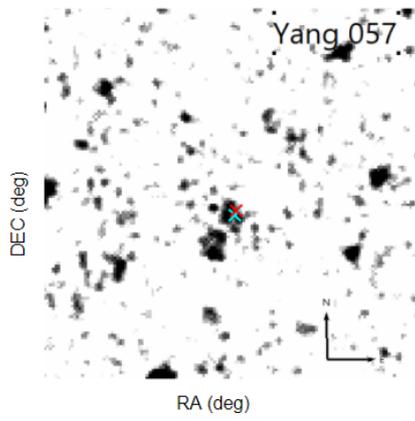
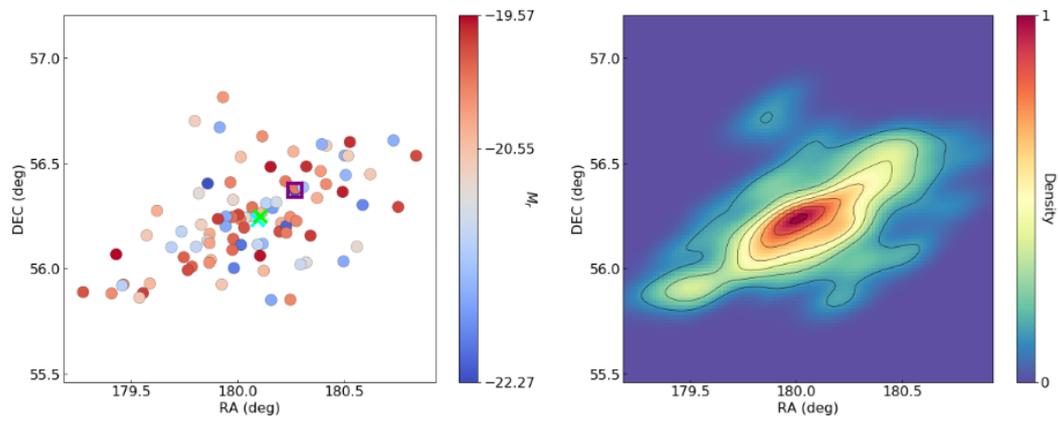


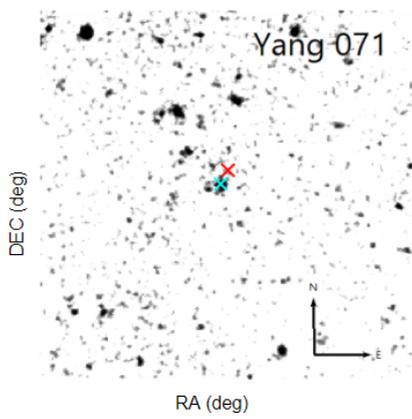
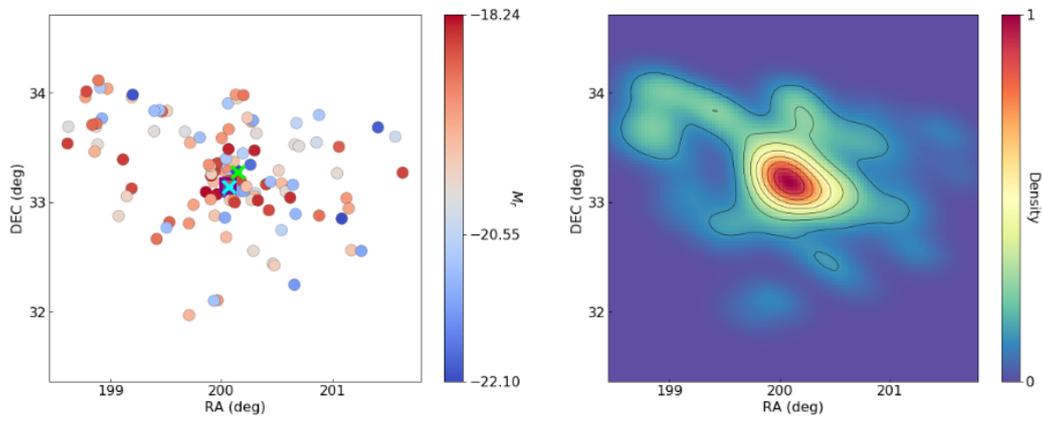
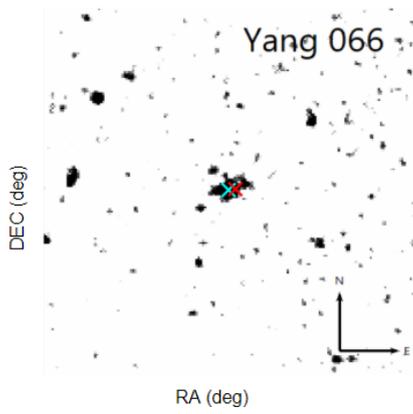
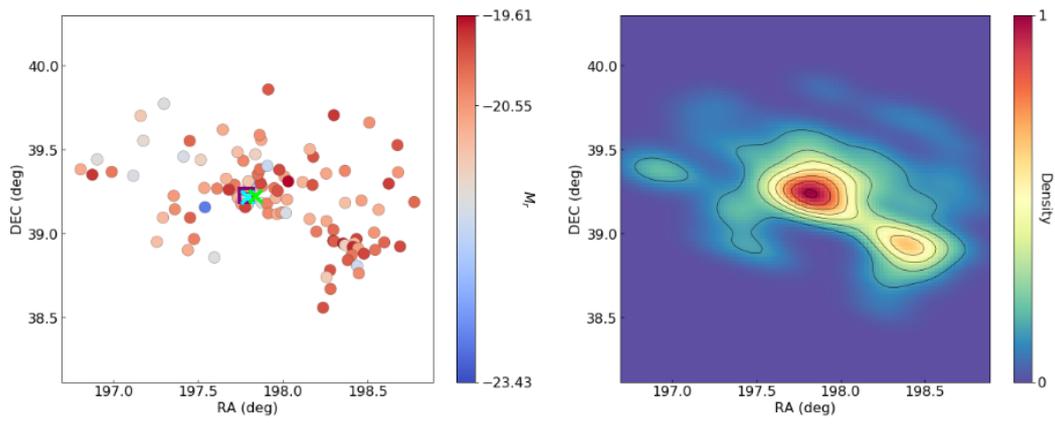


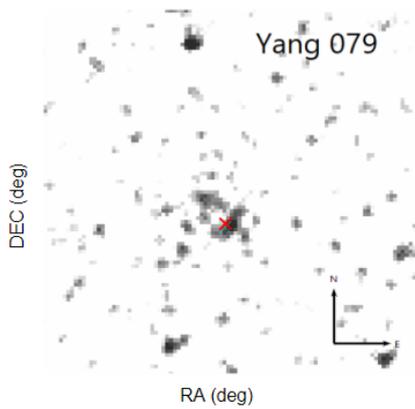
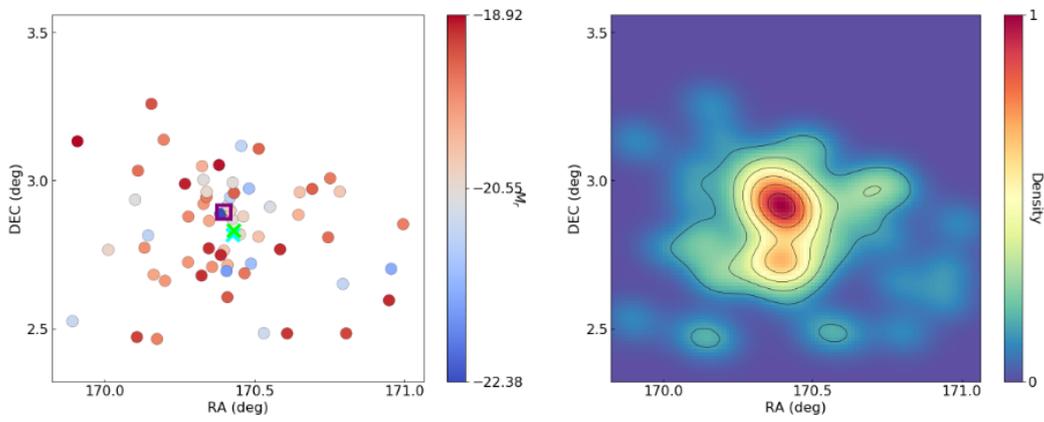
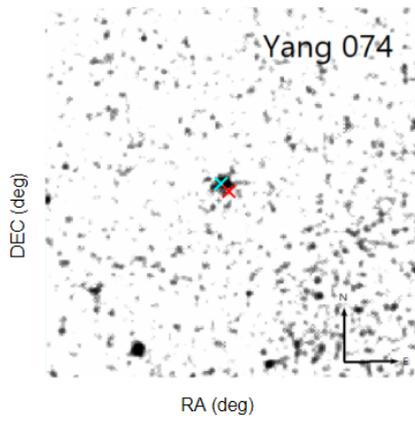
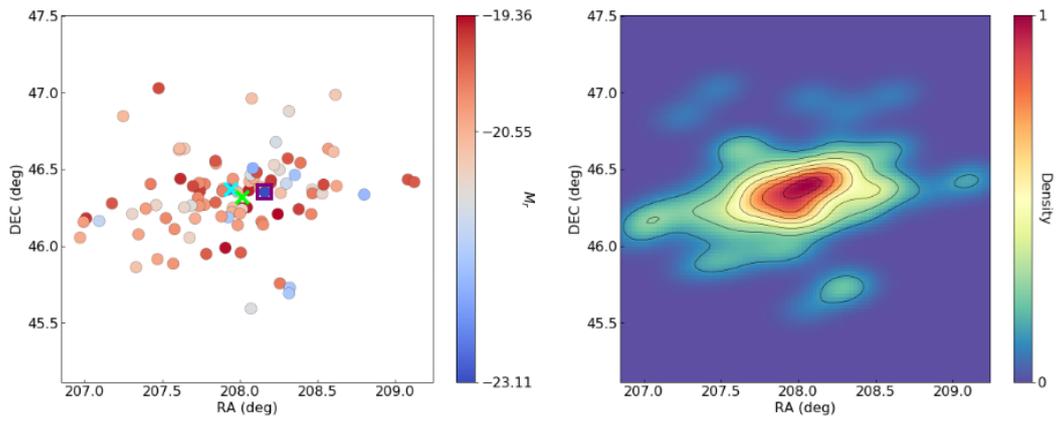


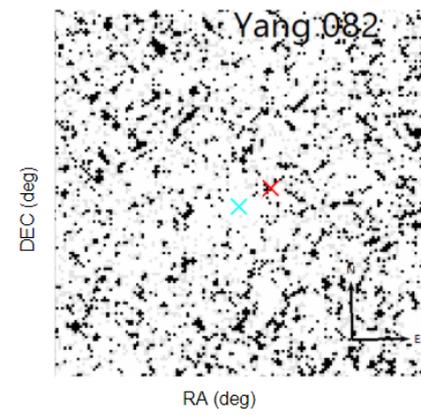
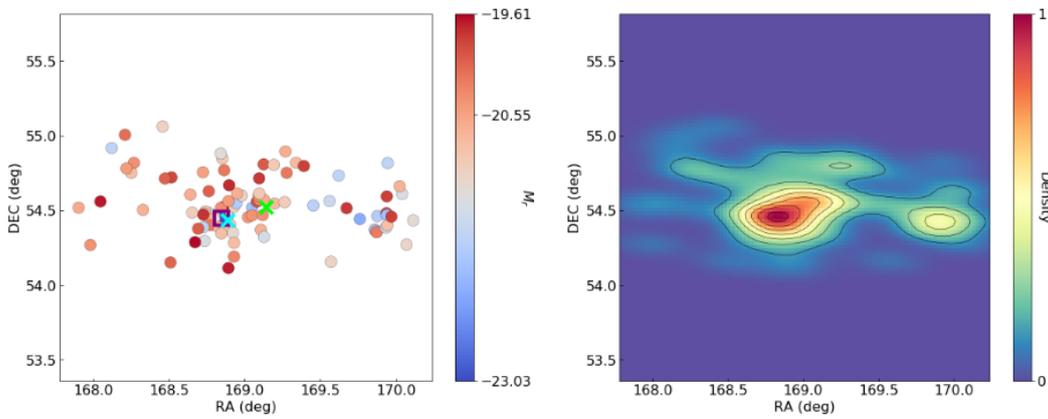
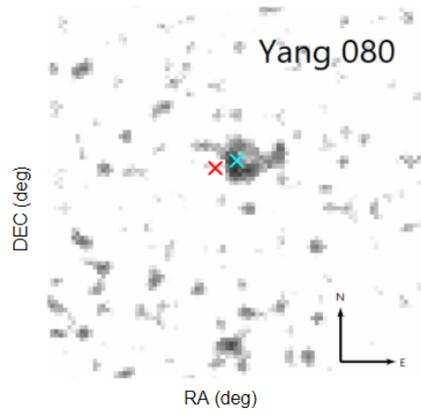
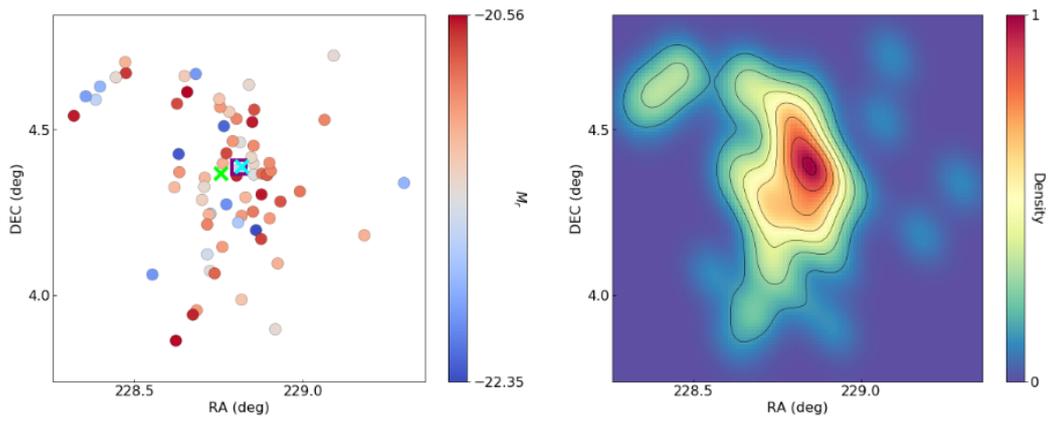


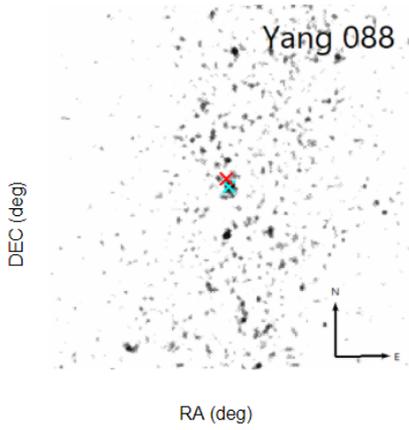
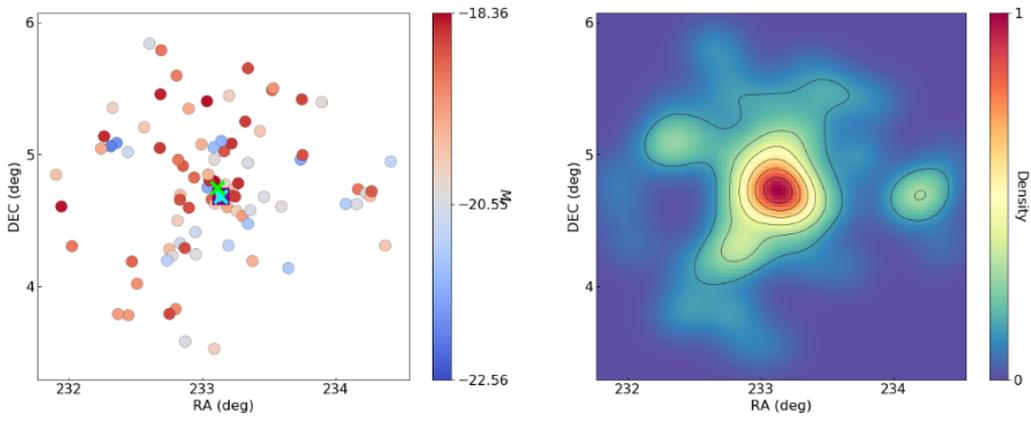
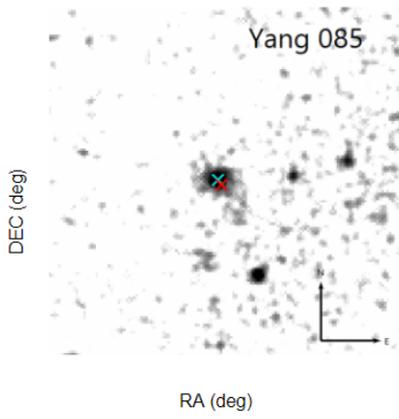
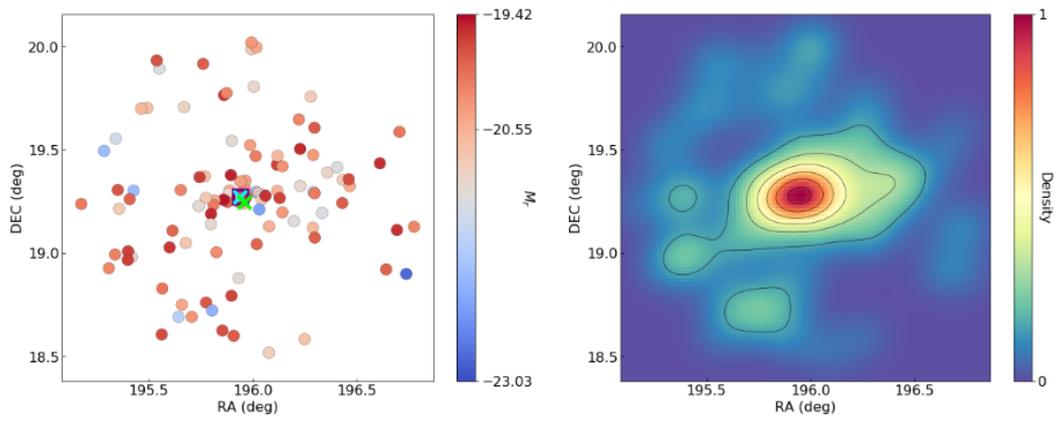


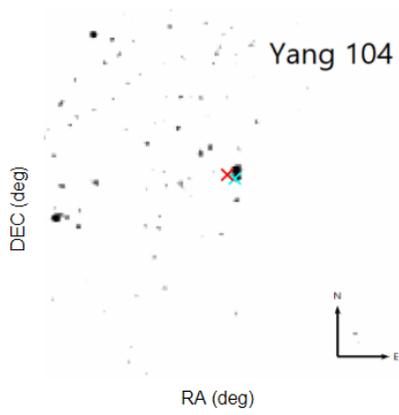
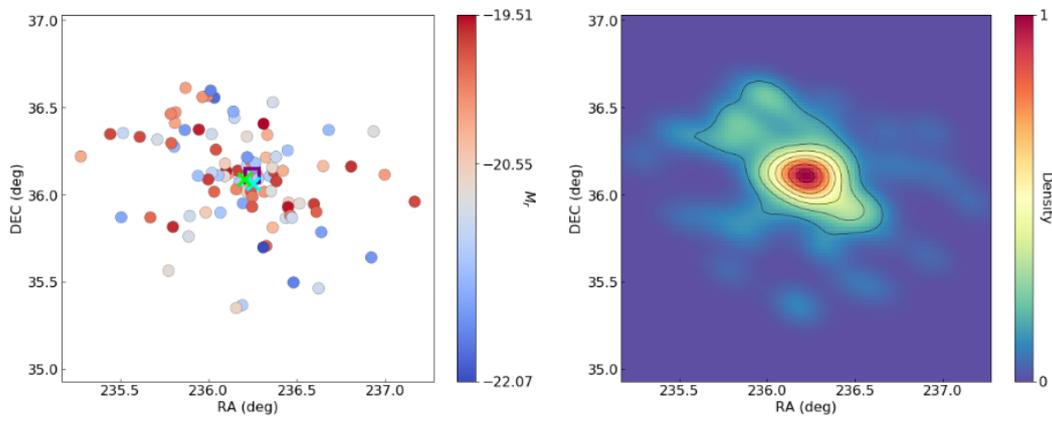
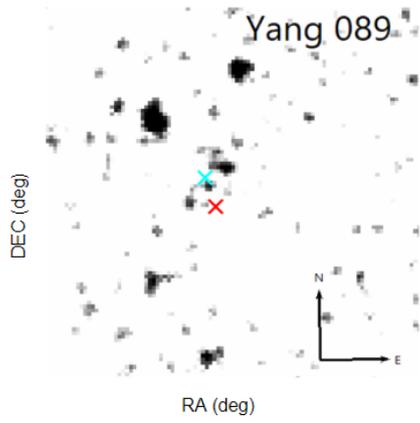
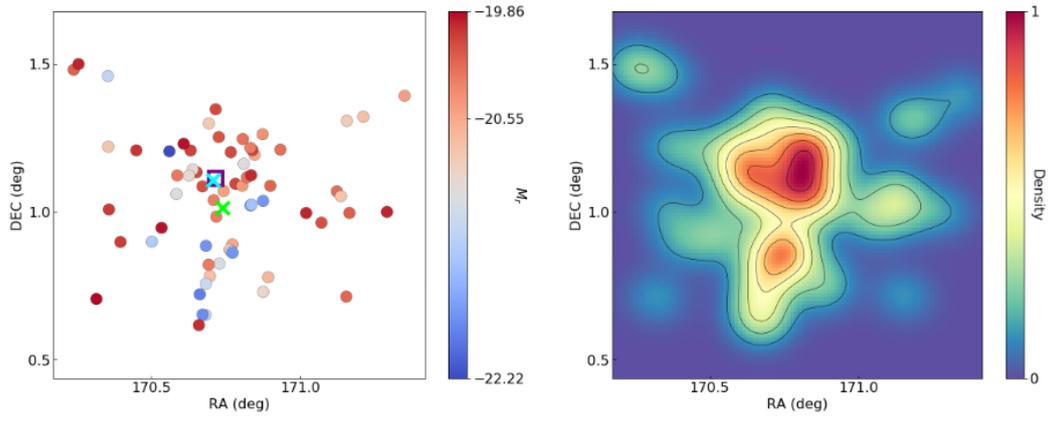


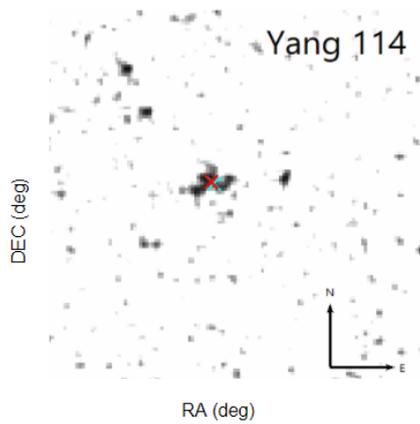
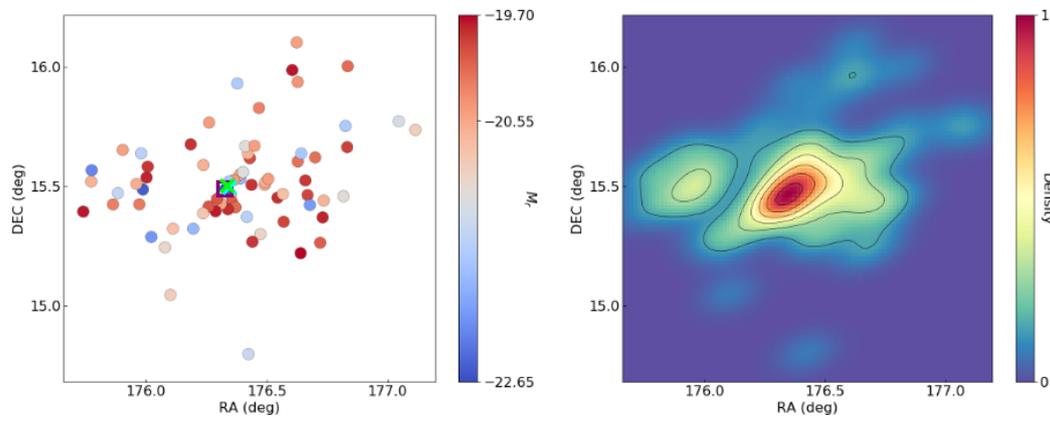
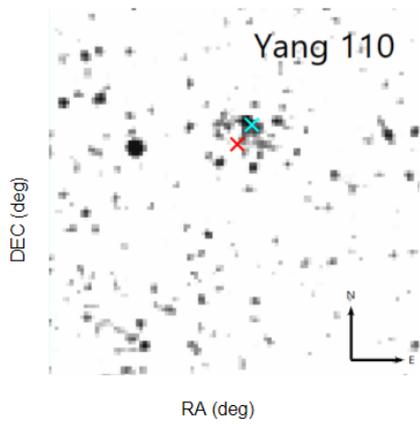
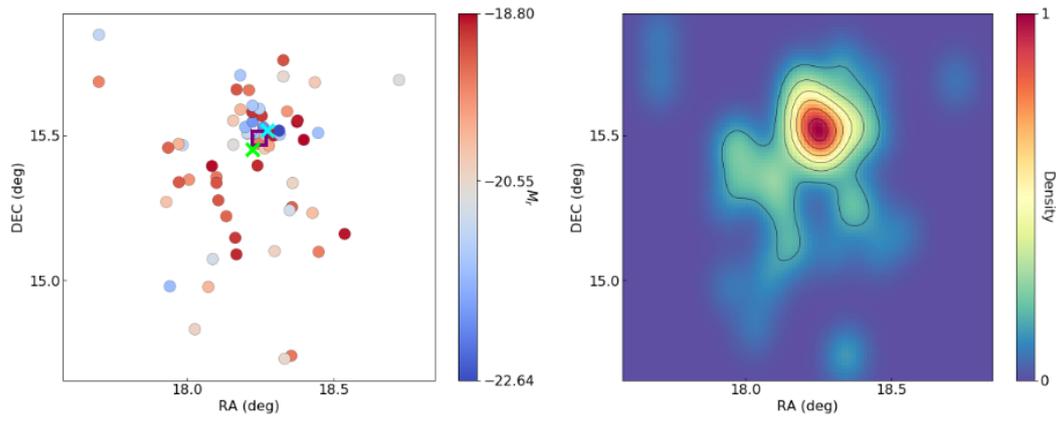


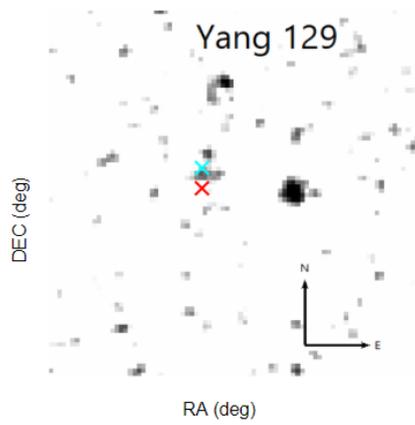
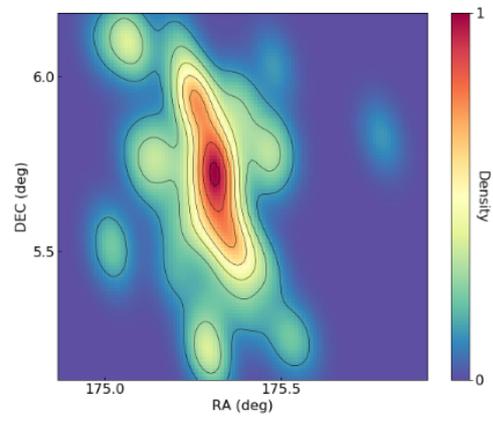
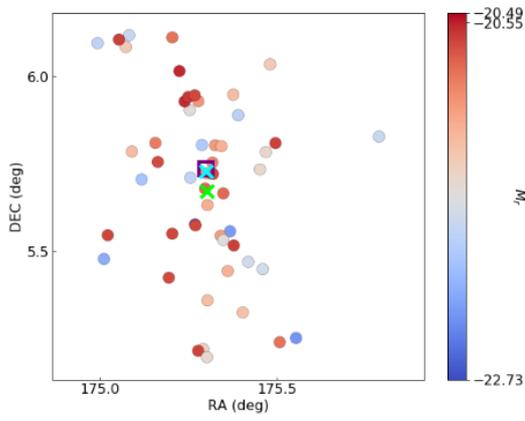
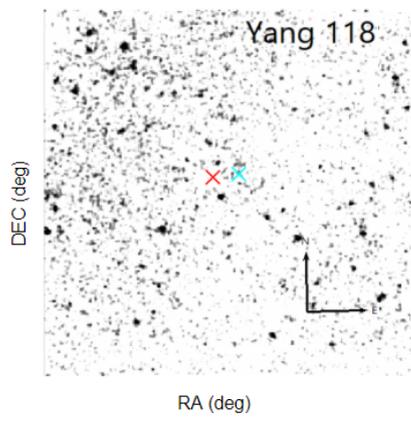
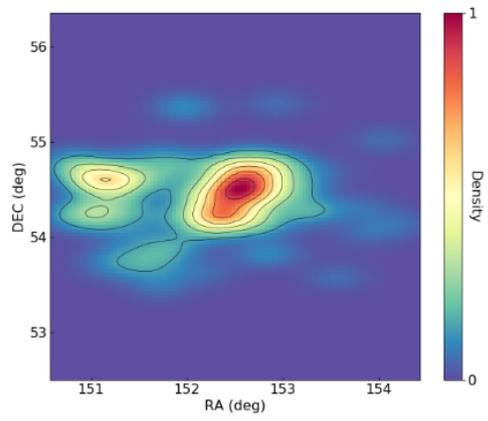
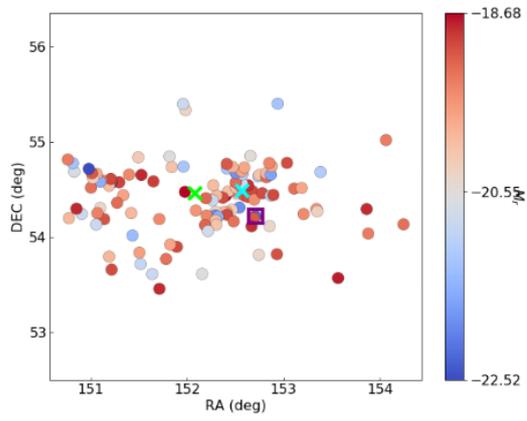


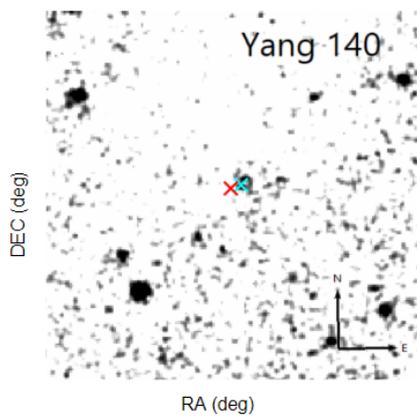
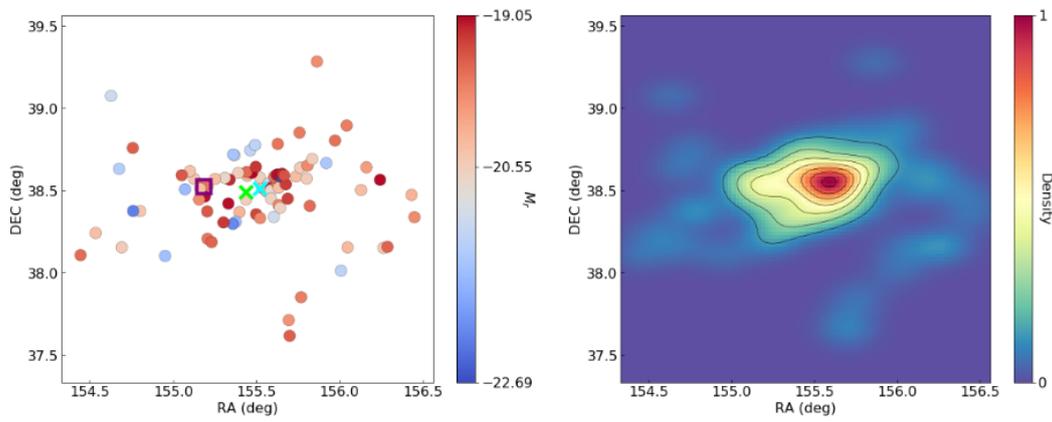
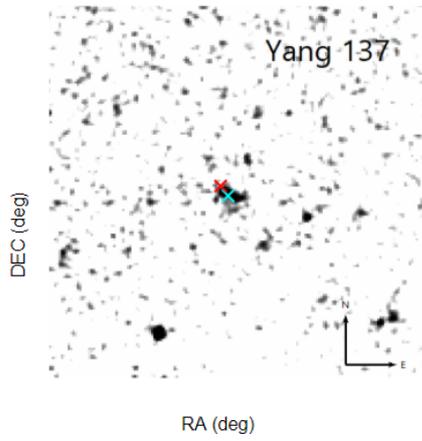
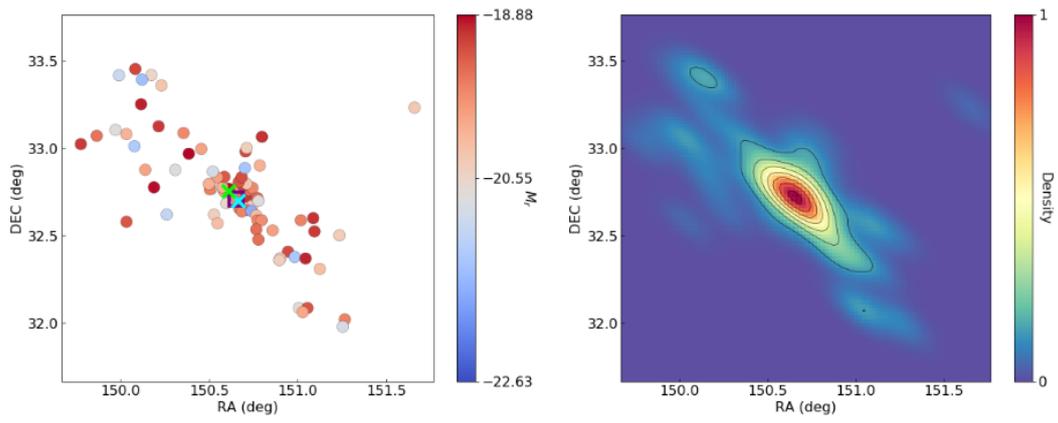


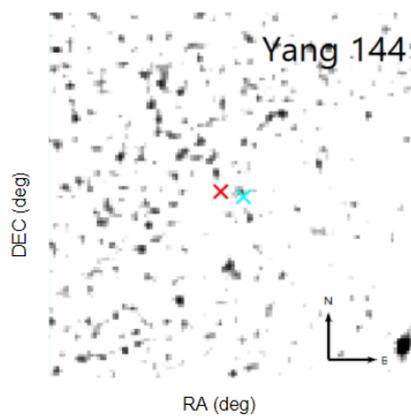
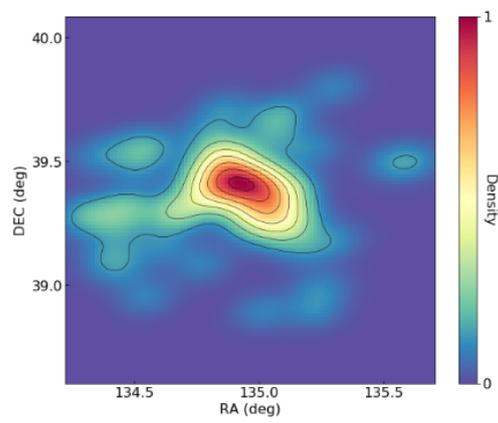
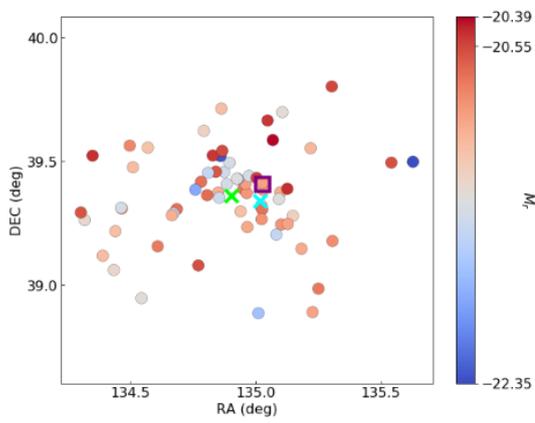
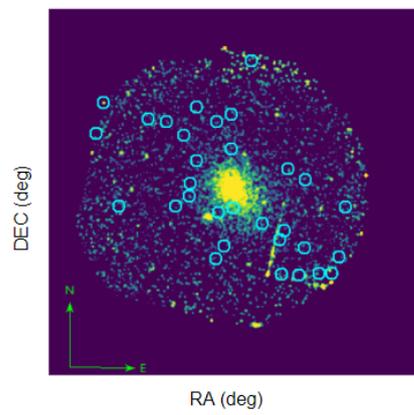
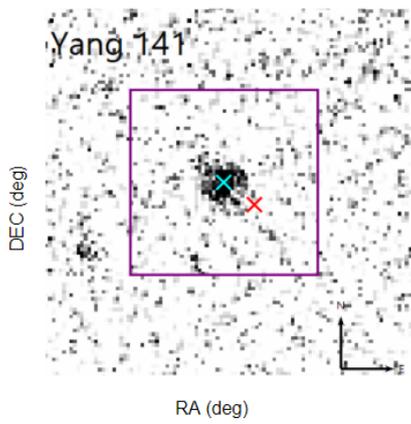
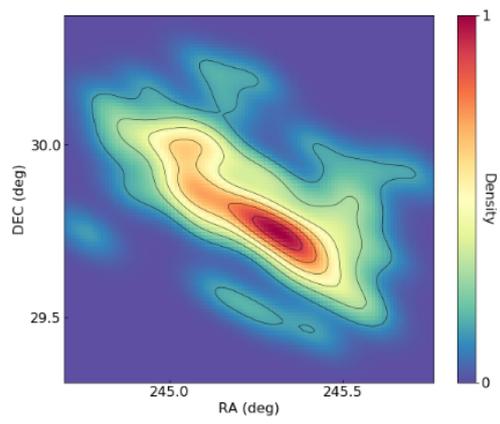
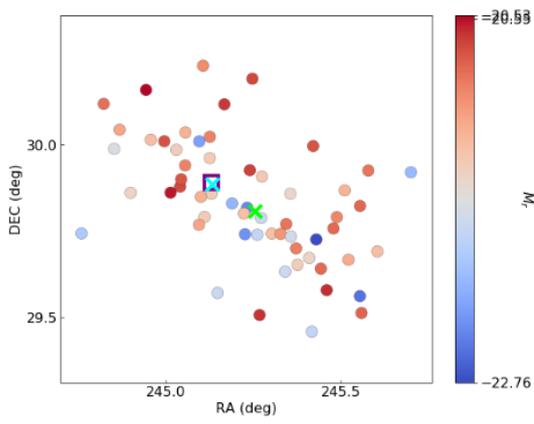


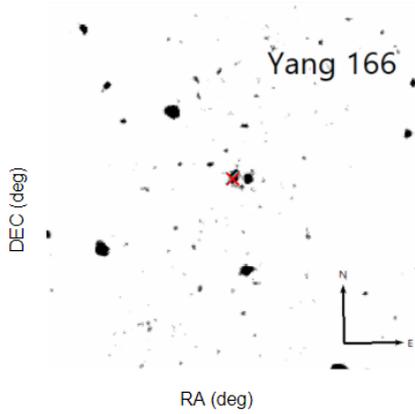
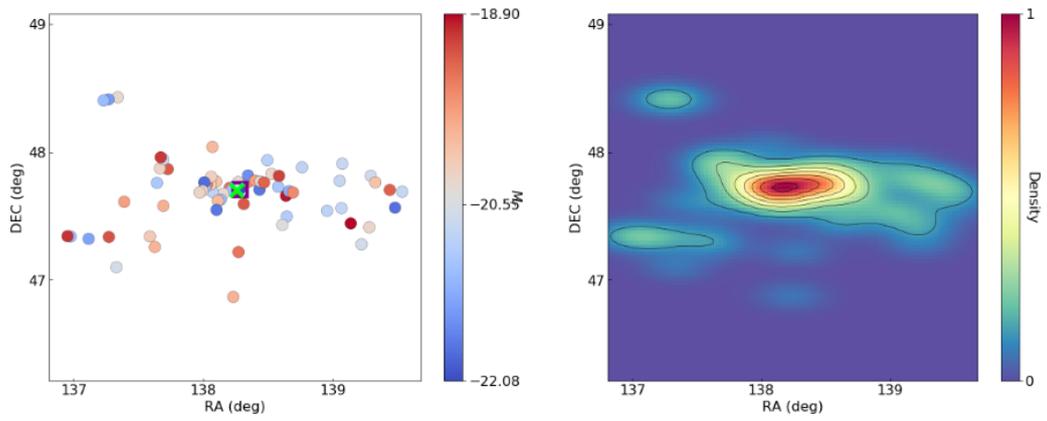
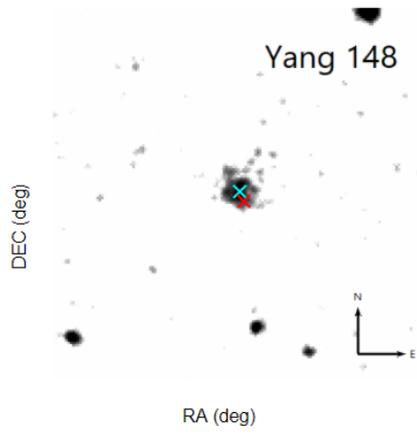
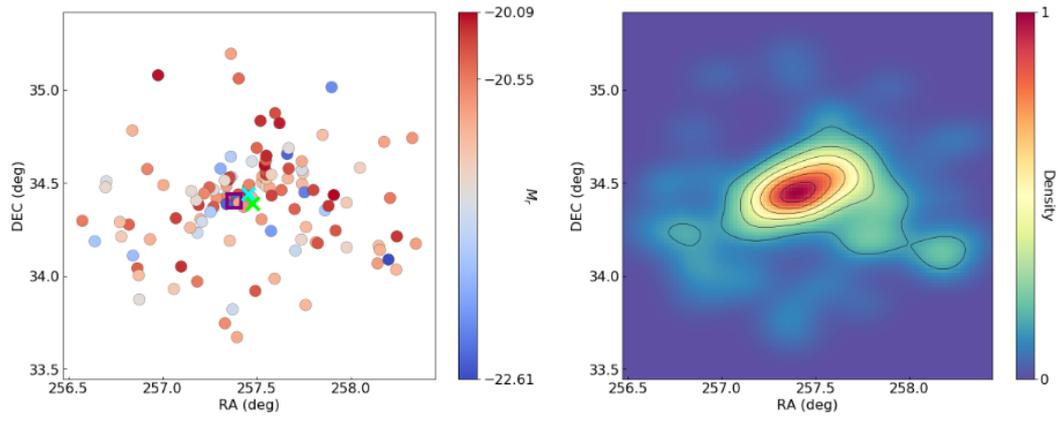


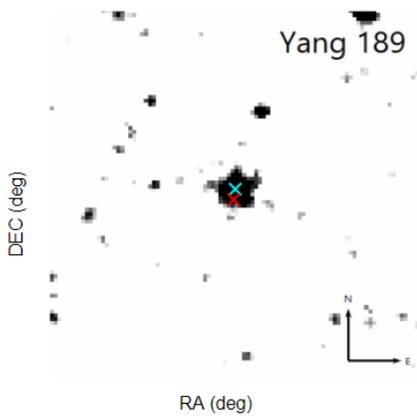
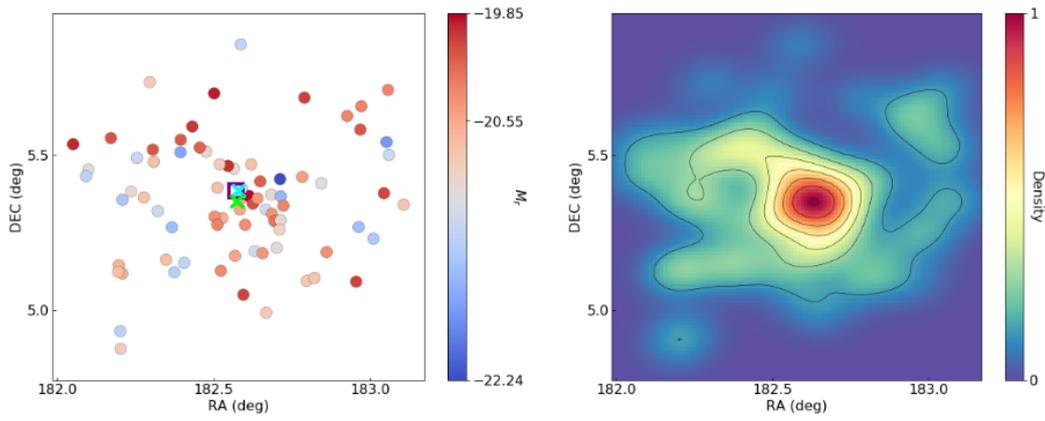
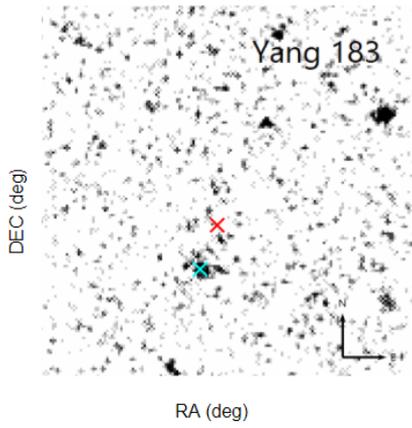
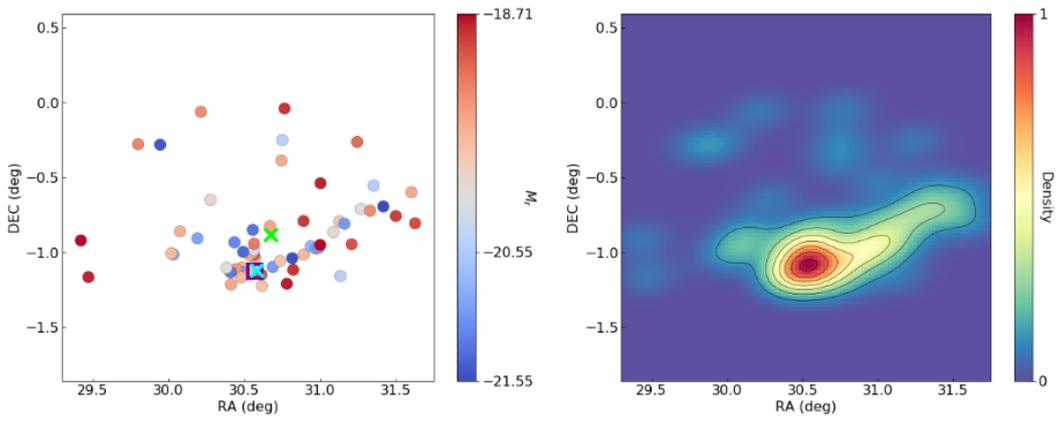


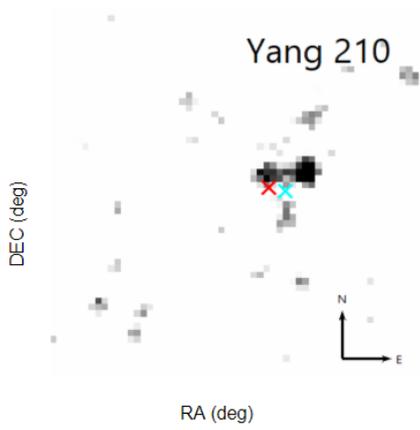
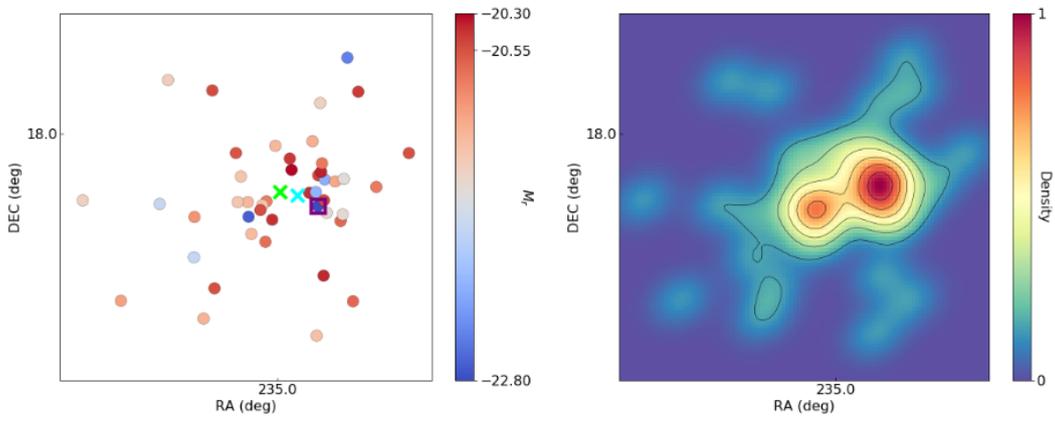
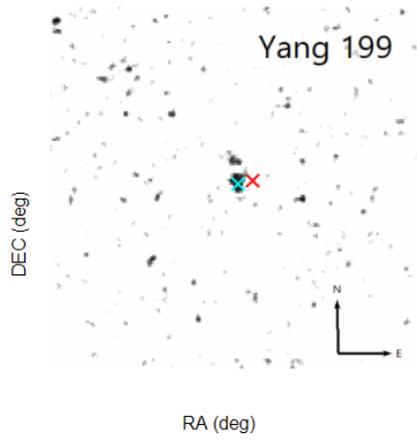
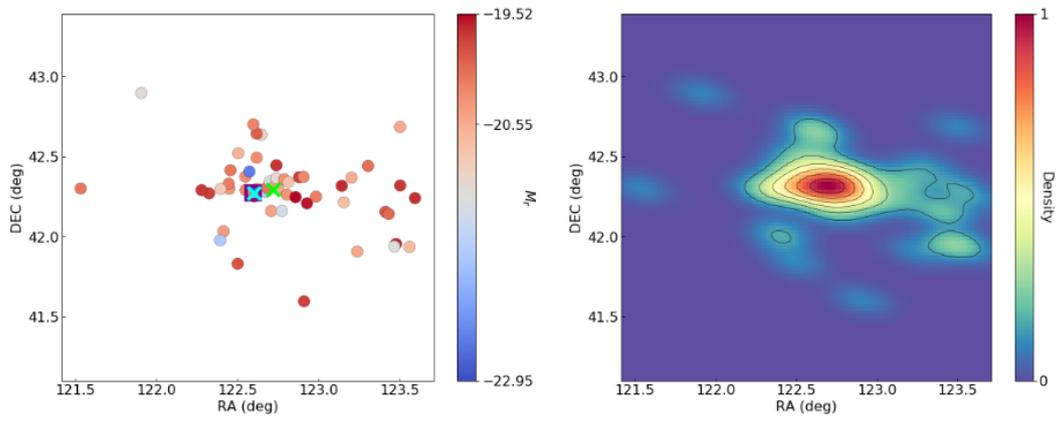


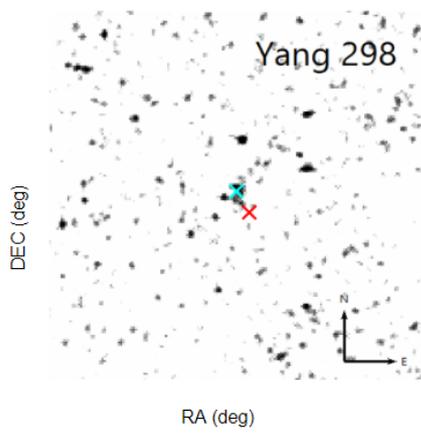
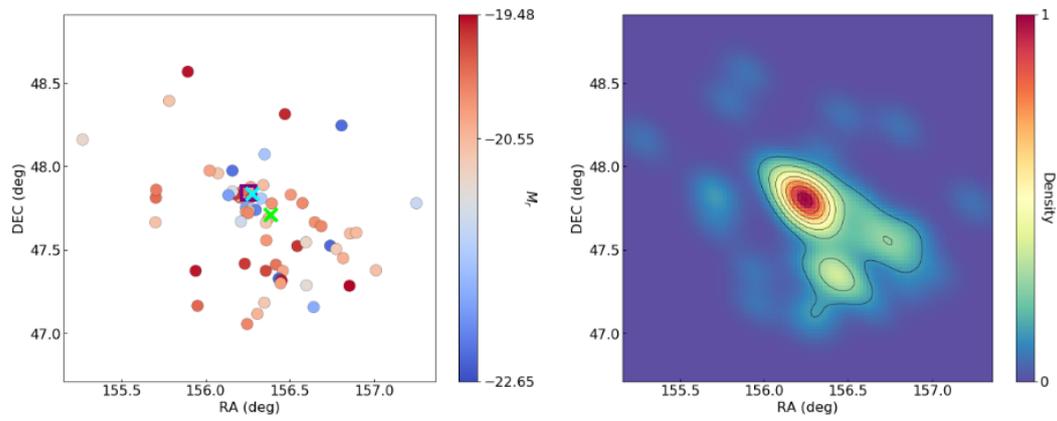
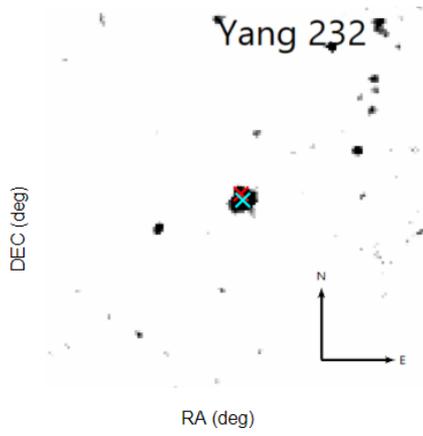
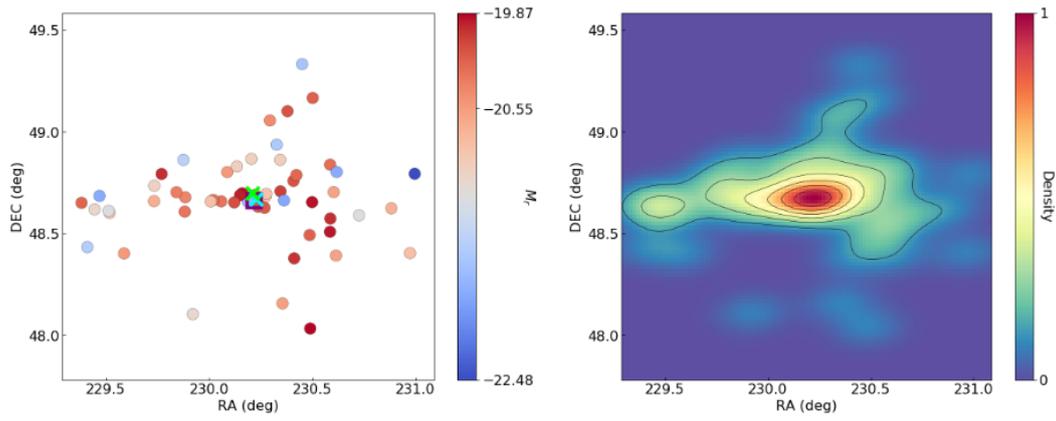


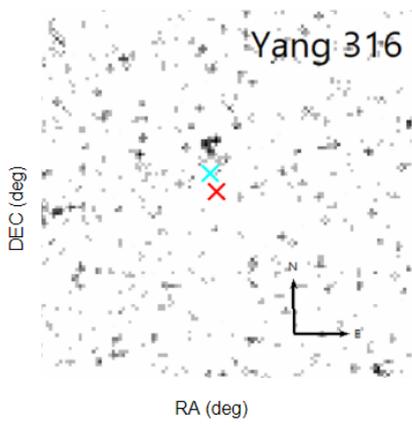
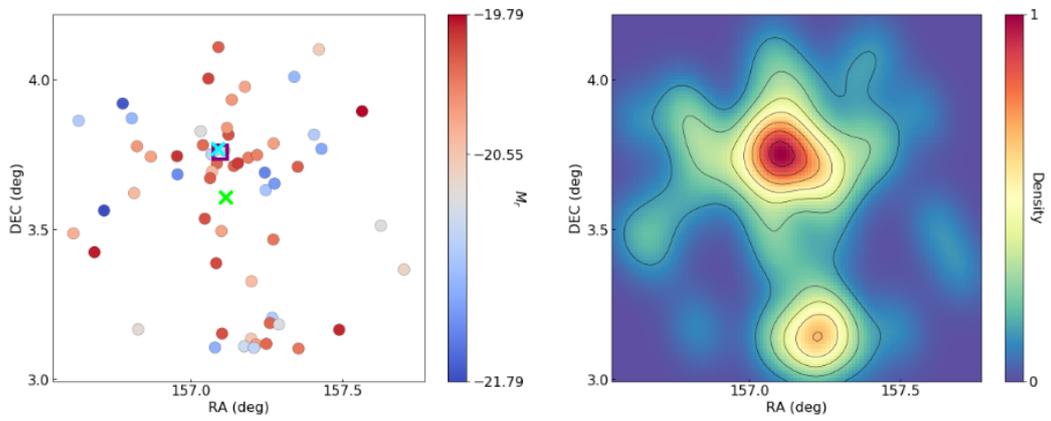
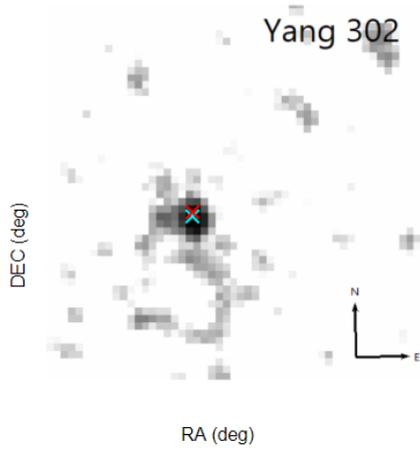
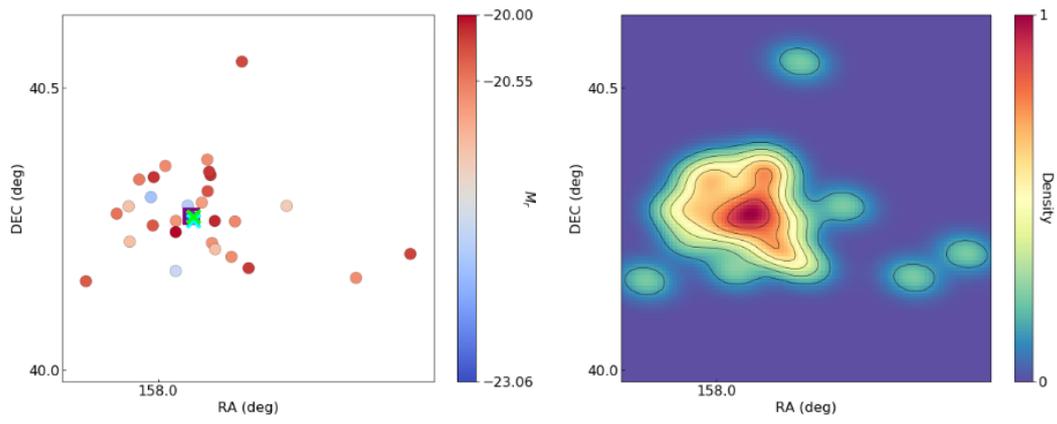


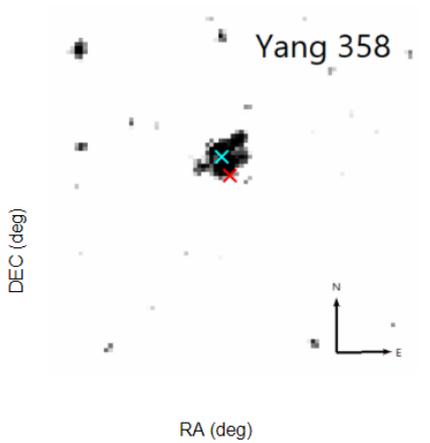
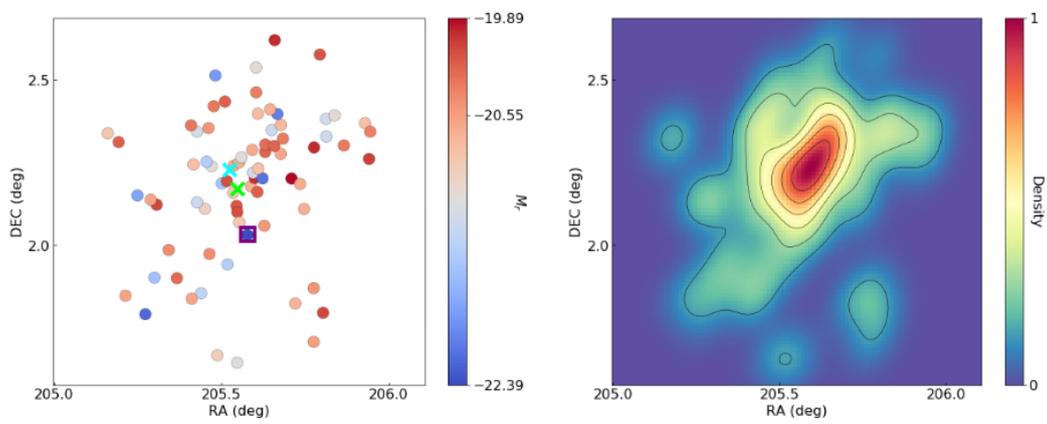
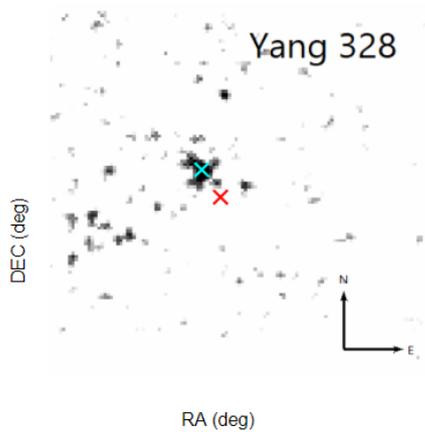
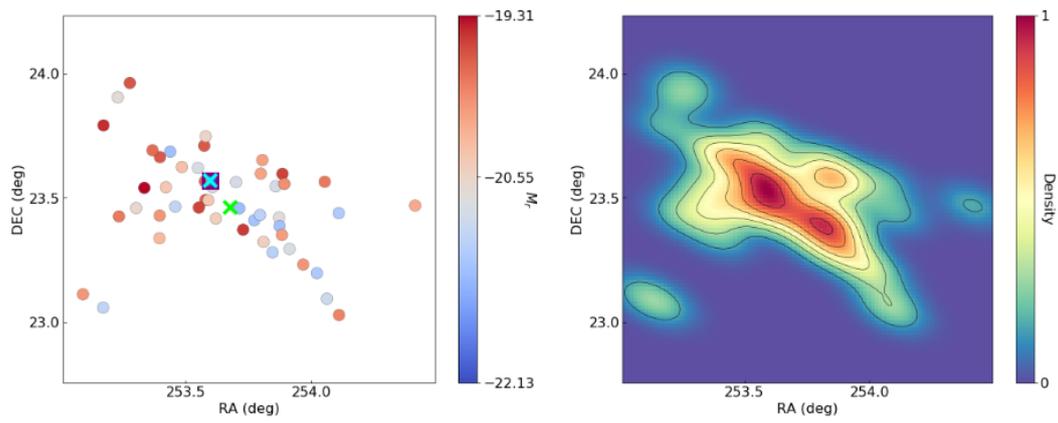


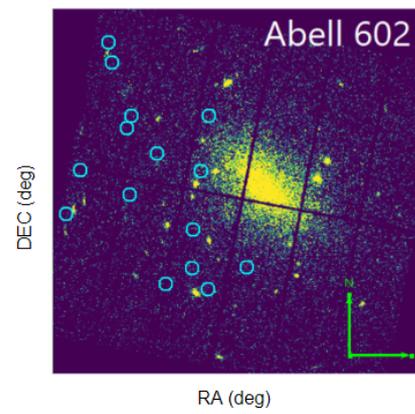
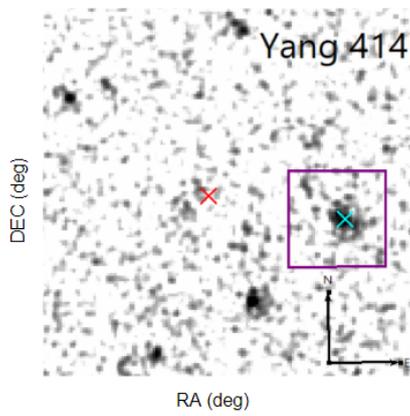
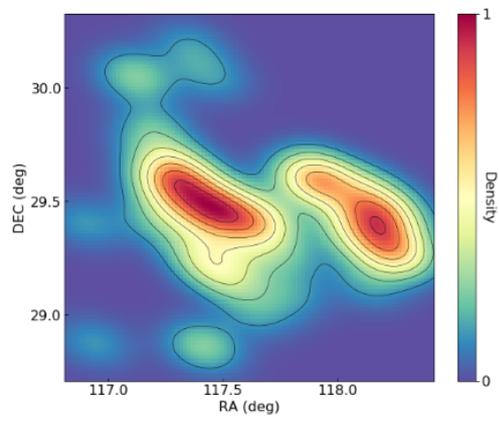
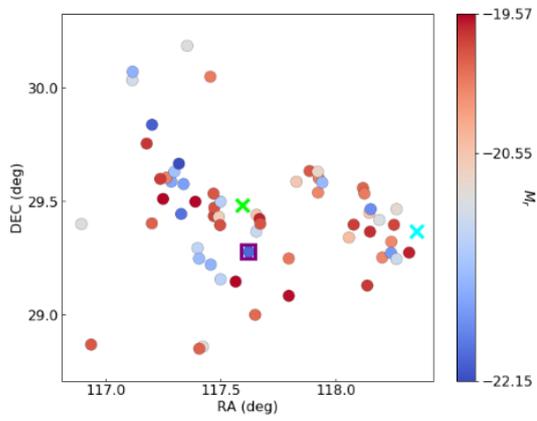
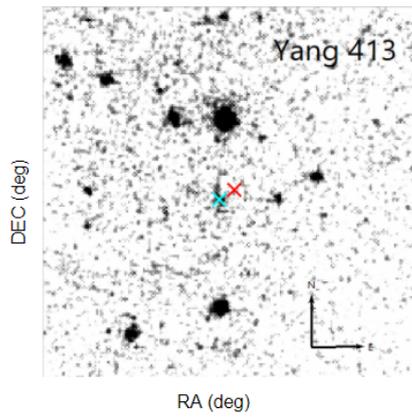
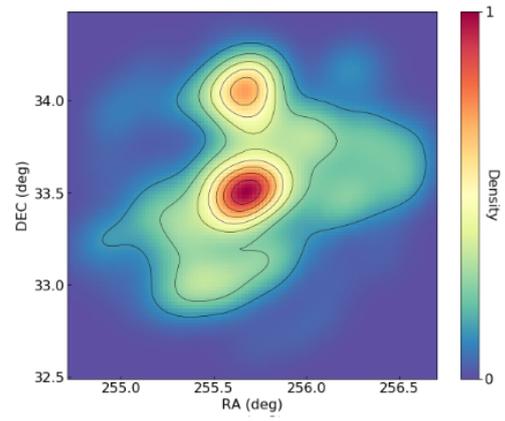
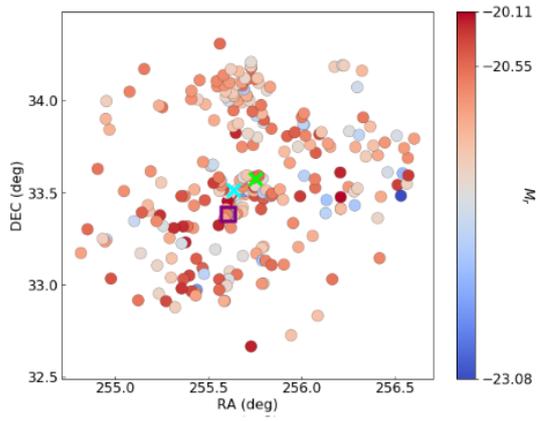


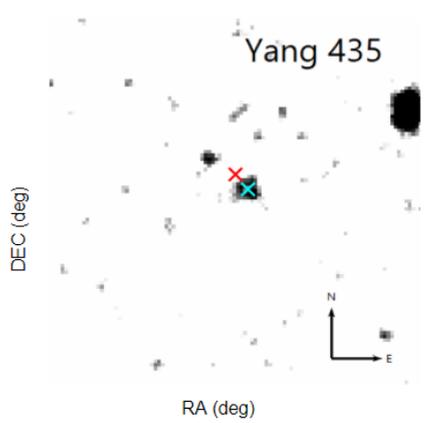
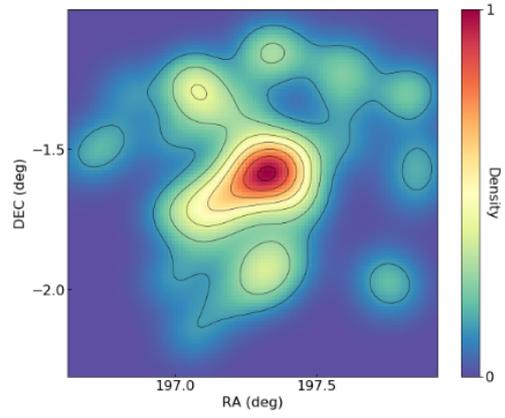
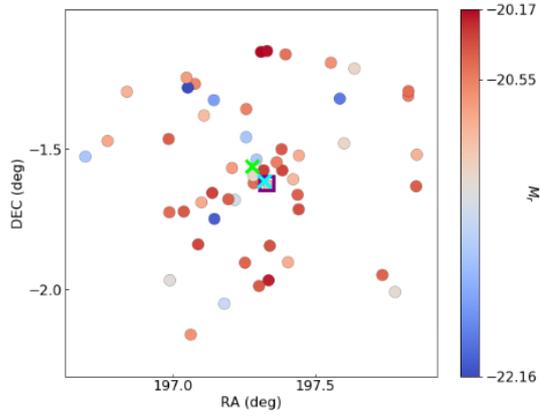
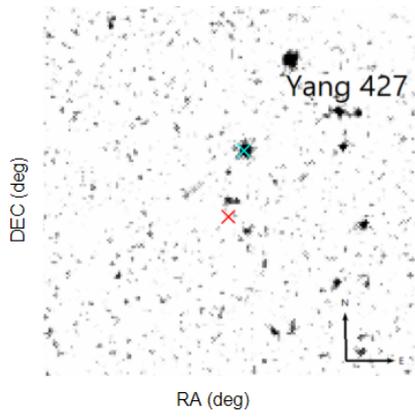
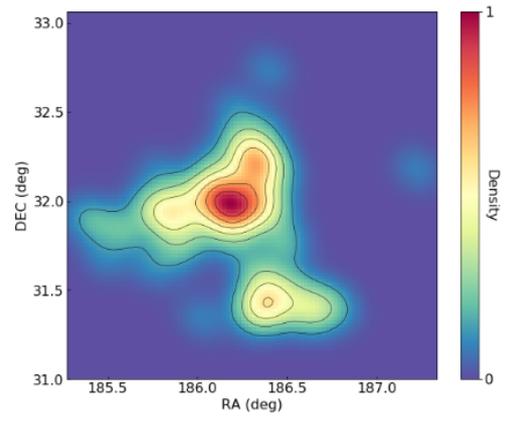
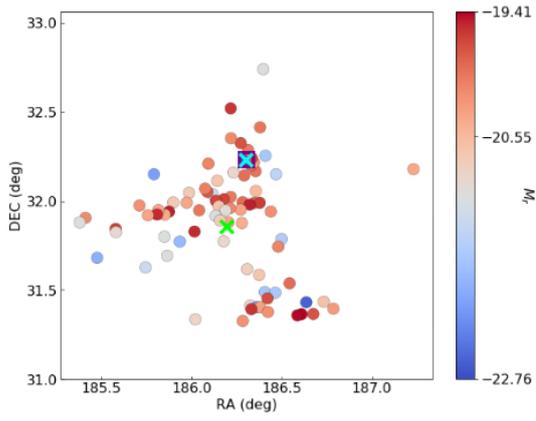


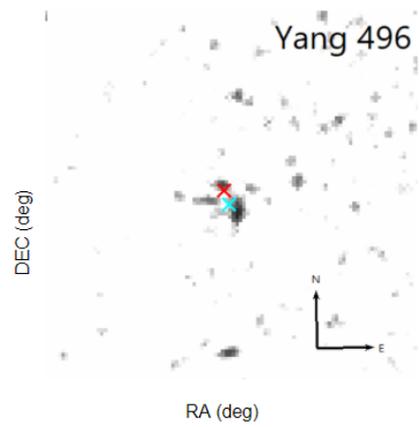
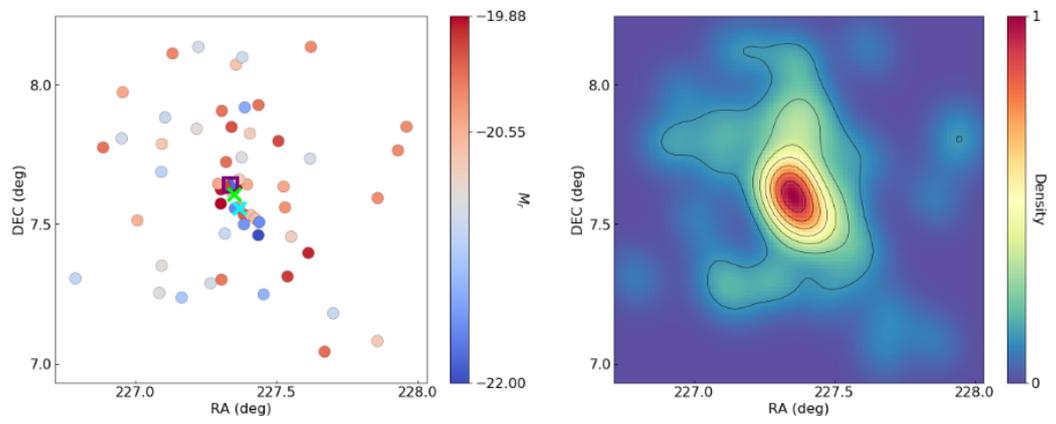
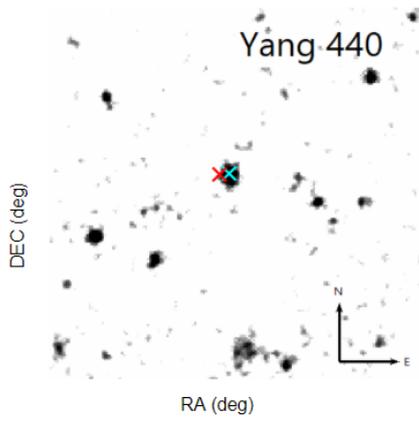
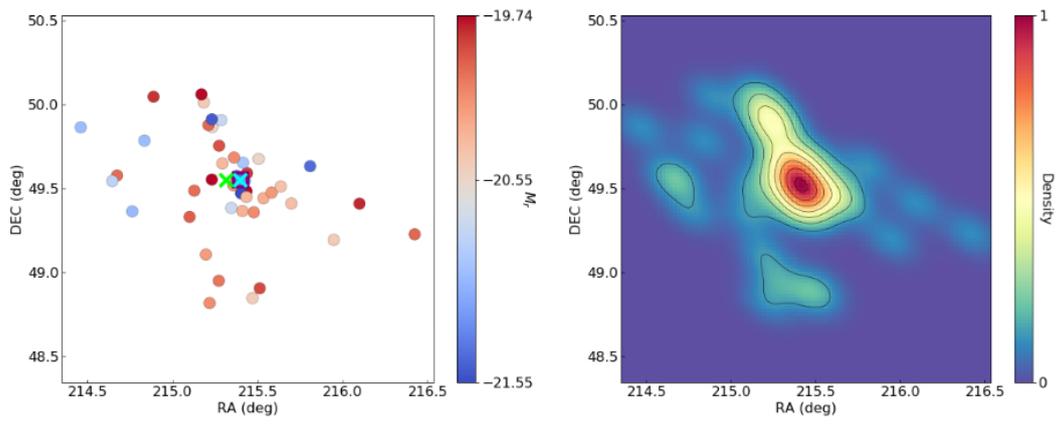


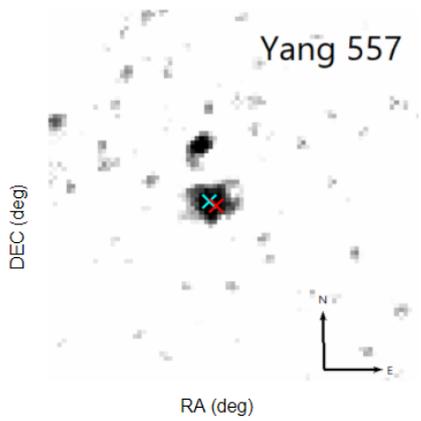
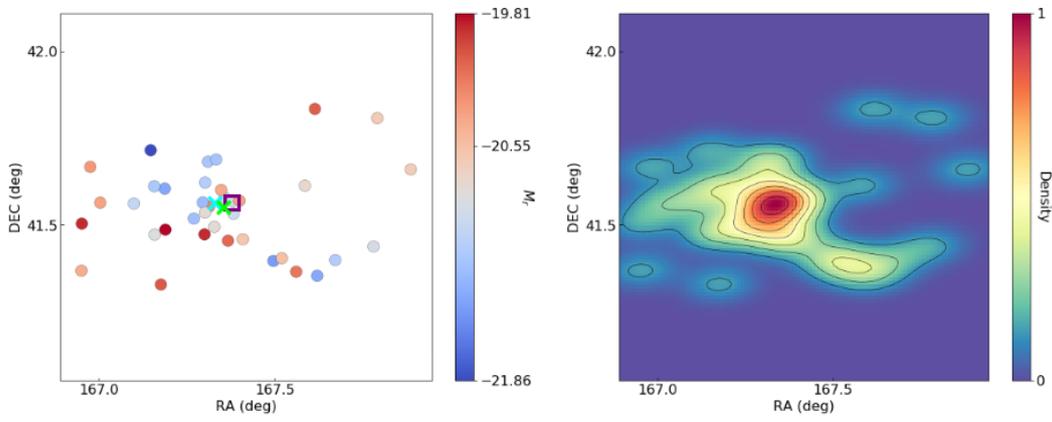
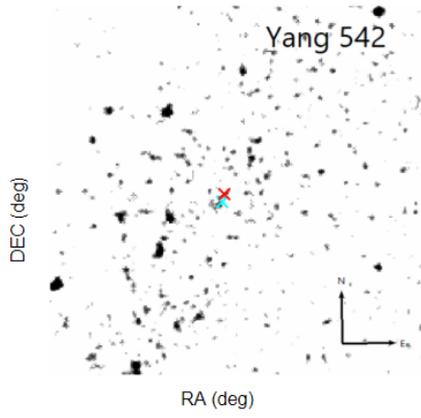
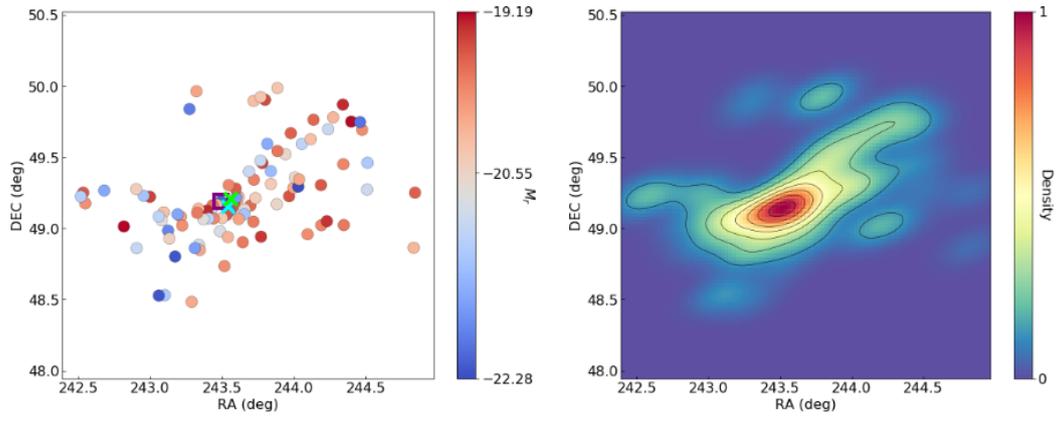


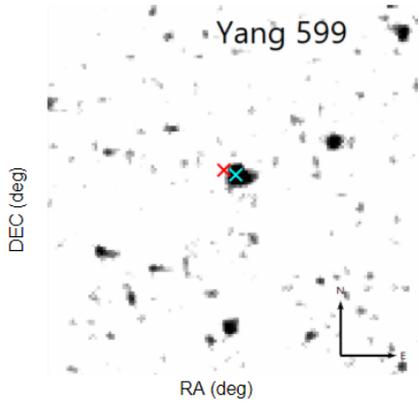
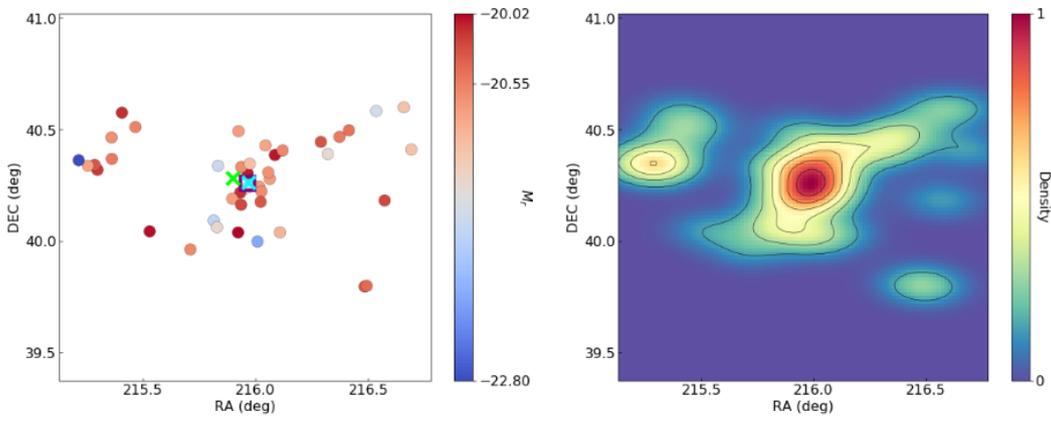
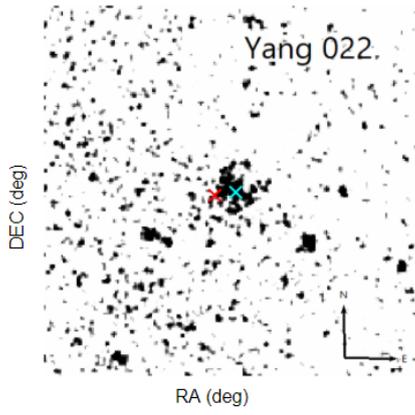
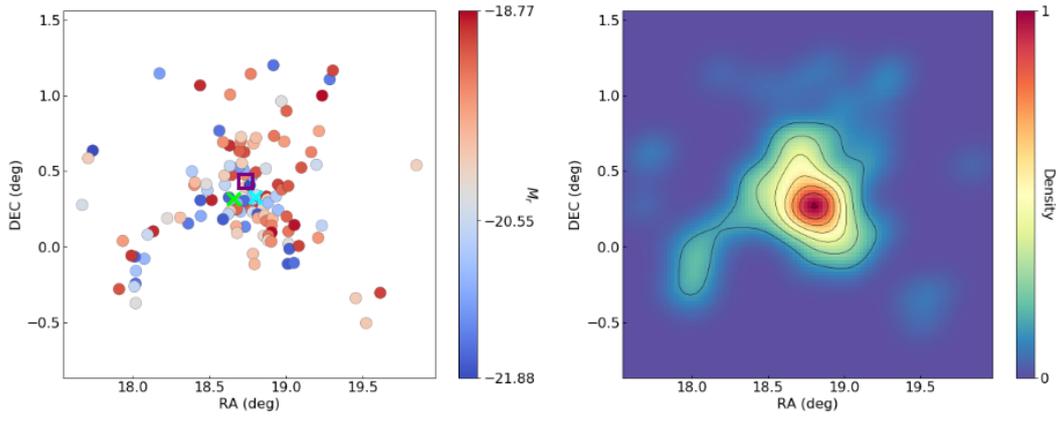












## APÊNDICE C - AGLOMERADOS COM CARACTERÍSTICAS ATÍPICAS NO ESPAÇO AR VS DEC

Examinando os diferentes mapas AR vs DEC dos aglomerados constituintes da Amostra 2, encontramos que alguns dos aglomerados apresentam características singulares quando comparadas ao restante dos aglomerados. Neste apêndice apresentamos em detalhes 3 aglomerados: 2 que apresentam  $d_{\text{opt,rx}} \geq 1000$  kpc, um valor extramente alto para a distância entre os centros óptico e em raios X, comparável com o raio do virial médio ( $\sim 1.5$  Mpc) da amostra; e 1 que apresenta uma distribuição de galáxias com um formato peculiar, o qual sugere que o aglomerado encontra no limitante de observação do levantamento SDSS.

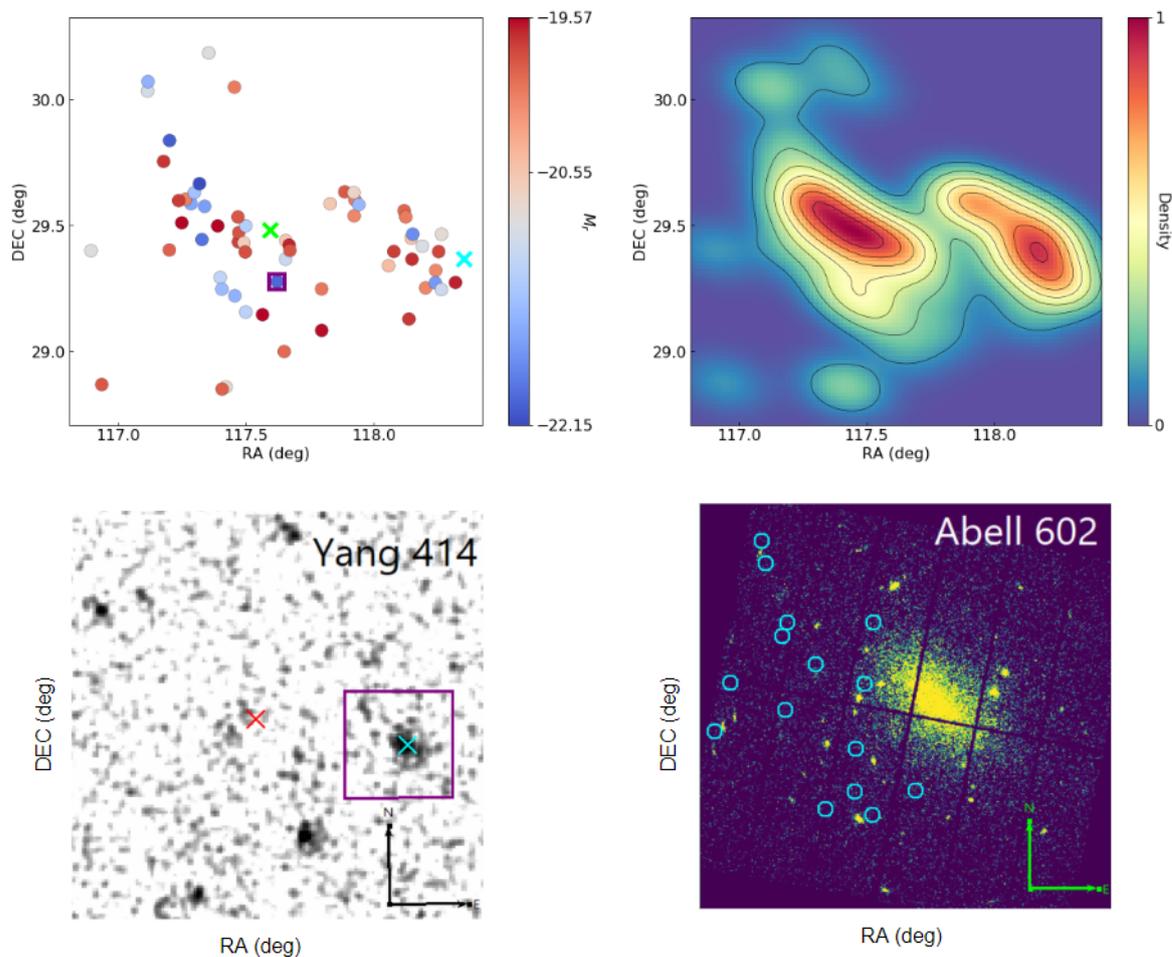
### C.1 Yang 414 e Yang 427 - interação entre grupos

O Aglomerado Yang 414 apresenta uma distância entre os centros óptico e em raios X de 2839 kpc, a qual é maior do que qualquer raio do virial encontrado para a aglomerados da Amostra 2. Ao examinarmos o espaço AR vs DEC desse aglomerado, apresentado na Figura C.3, encontramos indícios de dois grupos em interação, num processo de fusão.

O sistema Yang 414 originalmente definido por [Yang et al. \(2007\)](#) contém 27 galáxias membro. A redefinição feita por dC17 considera que o aglomerado possui 61 galáxias membro. A estrutura localizada a leste no mapa AR vs DEC contribui com 34 galáxias, mais do que o próprio número de galáxias consideradas por [Yang et al. \(2007\)](#). A estrutura à leste encontra-se próxima ao raio limite utilizado por dC17 na técnica de “Shiftgapper” ( $\sim 3.5$  Mpc) e possivelmente teve sua extensão limitada por esse raio. No banco de dados do experimento XMM o aglomerado mais próximo do centro óptico do sistema é o aglomerado Abell 602, associado a estrutura à leste. O centro óptico usado corresponde a um local onde os dados de raios-X do ROSAT indicam uma detecção de limite. O sistema definido por dC17 é classificado como G, indicando um processo de coalescência entre a estrutura definida em dC17 e o aglomerados Abell 602. O potencial gravitacional é dominado por Abell 602.

Outro sistema que também apresenta indícios de coalescência entre duas estruturas é Yang 427, no qual a distância entre centro óptico e em raios X é de 1546 kpc. A definição do sistema originalmente feita por [Yang et al. \(2007\)](#) conta com 27 galáxias, enquanto dC17 considera que o sistema consiste em 81 galáxias membro. Na caracterização do espaço AR vs DEC (Figura C.2) encontramos um grupo de galáxias ao sul da estrutura principal. No entanto nesse caso a subestrutura encontra-

Figura C.1 - Análise do espaço AR vs DEC para o aglomerados Yang 414.



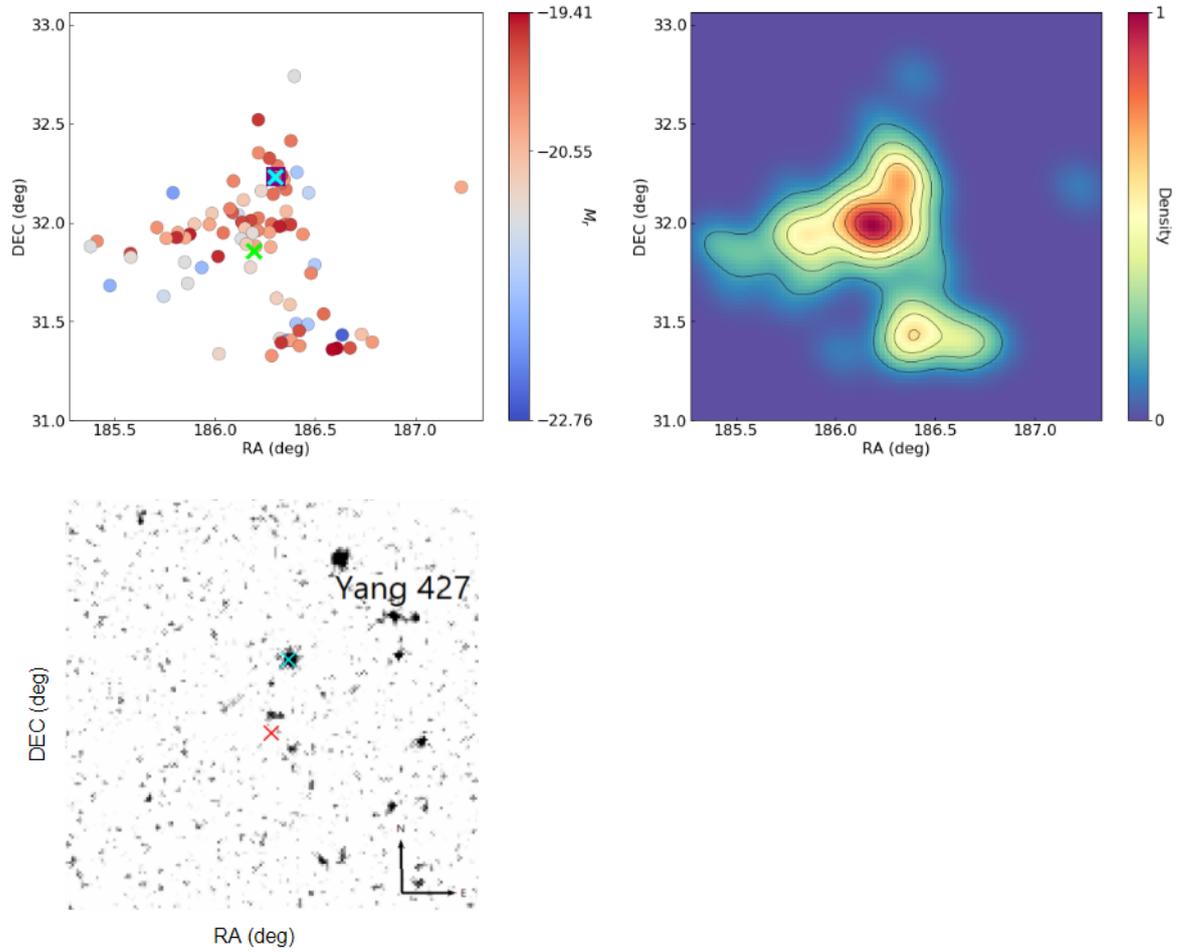
se totalmente englobada pelo raio utilizado por dC17 na técnica de “Shiftgapper”. Yang 427 apresenta distribuição de velocidade considerada gaussiana por dC17, o que também indica uma coalescência de duas estruturas. Nesse caso o potencial é dominado pela estrutura central.

## C.2 Yang 183 - limitado pela região do céu observada pelo levantamento SDSS

O levantamento SDSS é a principal fonte de dados deste trabalho, contudo suas observações não contemplam o céu inteiro<sup>1</sup>. Dentre os aglomerados aqui utilizados, Yang 183 apresenta uma distribuição de galáxias no espaço AR vs DEC atípica. Este sistema é composto por 43 galáxias segundo Yang et al. (2007) e 60 segundo dC17.

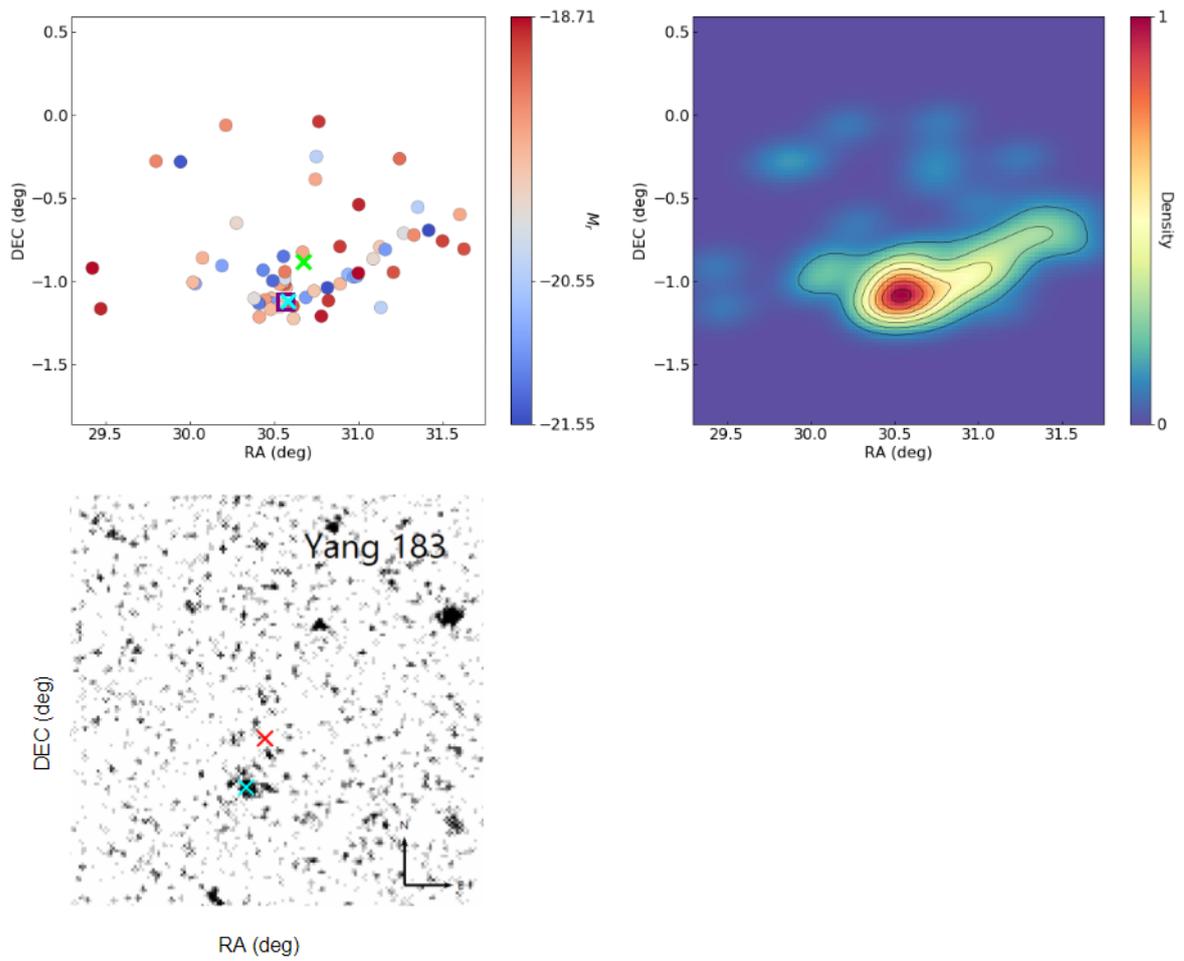
<sup>1</sup>Para mais detalhes sobre a cobertura do céu disponível no SDSS-DR7 consulte “<https://classic.sdss.org/dr7/coverage/>”.

Figura C.2 - Análise do espaço AR vs DEC para o aglomerado Yang 427



Notamos na Figura C.3 um súbito decréscimo na densidade de galáxias na faixa  $DEC \sim -1.25$ , próximo a região central do sistema. Examinando o banco de dados do levantamento SDSS-DR7, encontramos que o levantamento, para esta faixa de AR, não coletou dados em  $DEC \leq -1.5^\circ$ . O decréscimo observado na densidade de galáxias nesse caso está relacionado a um corte artificial imposto pela coleta de dados do levantamento.

Figura C.3 - Análise do espaço AR vs DEC para o aglomerado Yang 183



## APÊNDICE D - A VALIDAÇÃO DE RESULTADOS POR MEIO DO P-VALUE NA ASTRONOMIA

Durante este trabalho apresentamos diversas vezes p-values com o intuito de avaliar a semelhança estatística entre duas distribuições empíricas. Testes estatísticos são essenciais na ciência e fornecem um método de investigação capaz de discriminar duas distribuições empíricas que sejam resultado de duas amostragens da mesma distribuição original. Em geral estes testes são formulados de forma a aceitar ou rejeitar uma hipótese principal, chamada de hipótese nula<sup>1</sup>. Avaliamos se existe diferenças significativas entre duas distribuições empíricas para que a hipótese nula seja rejeitada, o que é definido por meio do parâmetro p-value. Este parâmetro denota a probabilidade de aceitação (ou rejeição) da hipótese nula. Um p-value de 0.1 representa que a hipótese nula é rejeitada com 90% de confiabilidade. Dessa forma, ao estabelecermos um limite inferior para a probabilidade da rejeição da hipótese principal, podemos caracterizar a semelhança estatística entre duas distribuições. Usualmente o limite inferior adotado é  $\alpha = 0.05$ , o que significa que a hipótese nula é rejeitada somente em casos em que há uma confiabilidade maior do que 95%. Ressaltamos que o p-value não é um caracterizador das diferenças entre as distribuições. Este parâmetro atua simplesmente para avaliar a confiabilidade da rejeição da hipótese nula, sendo que a única afirmação que podemos fazer a partir de p-values superiores a 0.05 é a de que não podemos concluir se existe uma diferença significativa entre as duas distribuições empíricas.

Para garantir a robustez dos resultados apresentados neste trabalho, utilizamos três abordagens diferentes para avaliar a semelhança estatística entre duas distribuições, são elas: teste de permutação, teste de Anderson-Darling (AD), teste de Wilcoxon. Neste apêndice apresentamos brevemente as definições dos quatro testes e comparamos de forma crítica com os resultados obtidos com um teste vastamente utilizado na astronomia, o teste Komolgorov-Smirnov (KS)

- Teste de permutação: sejam  $\{X_A\}$  e  $\{X_B\}$  os dois conjuntos de dados observados, que dão origem as distribuições empíricas  $P_A$  e  $P_B$ . A primeira etapa consiste no cálculo da diferença entre as médias de  $P_A$  e  $P_B$  ( $\Delta m_0$ ). O teste prossegue com permutações aleatórias, sem reposição, entre os elementos dos conjuntos  $X_A$  e  $X_B$ , gerando dois novos conjuntos a cada iteração  $i$ ,  $X_A^i$  e  $X_B^i$ , os quais possuem uma nova diferença entre suas médias,  $\Delta m_i$ . A

---

<sup>1</sup>Nos testes aqui realizados a hipótese nula pode ser expressa como: “as duas distribuições empíricas são duas amostragens de uma mesma distribuição original”.

equivalência estatística é então calculada a partir da fração de permutações que resultaram  $\Delta m_i > \Delta m_0$ ;

- Teste AD: para duas distribuições empíricas, o teste AD utiliza uma expressão analítica que estima a probabilidade de cada uma ter sido gerada a partir de uma distribuição hipotética. A expressão analítica é escrita como:

$$A^2 = n \sum_{i=1}^N \frac{[i/n - F_0(X_i)]^2}{F_0(X_i)(1 - F_0(X_i))}$$

onde  $F_0$  denota a distribuição cumulativa de probabilidade observada até o dado  $X_i$ . A semelhança estatística é então calculada a partir do valor de  $A^2$ .

- Teste de Wilcoxon: no teste de Wilcoxon a equivalência estatística é calculada a partir da diferença entre pares de dados. Sejam  $X_A$  e  $X_B$  dois conjuntos de dados que definem duas distribuições de probabilidades empíricas, cada um com  $N$  observações. Os dados são organizados em pares, formando  $N$  duplas de dados. Calcula-se então a diferença entre os membros de cada par ( $\Delta m_i = x_{A,i} - x_{B,i}$ ). Os pares com diferença nula são excluídos, restando um conjunto de  $N_r$  duplas. O conjunto restante é organizado crescentemente com o valor absoluto da diferença e ranqueado de acordo com sua posição no conjunto. Ou seja, ao par de menor diferença é assinalado com o ranque 1, aquele com a segunda menor diferença com o ranque 2 e assim por diante. Então, o parâmetro  $W$  é calculado a partir dos pares como

$$W = \sum_{i=1}^{N_r} [\text{sgn}(\Delta m_i) \times R_i]$$

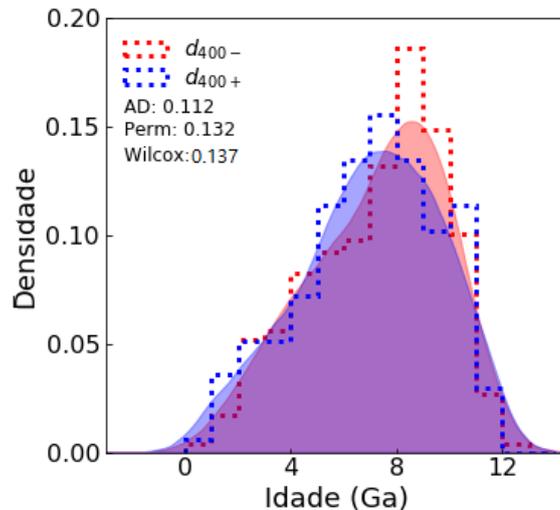
onde  $\text{sgn}$  denota a função sinal que retorna o sinal de  $\Delta m_i$  e  $R_i$  denota o ranque do par  $i$ . A decisão de aceitar ou rejeitar a hipótese é feita com base na veracidade da inequação  $|W| > W_{crit, N_r}$ , onde  $W_{crit, N_r}$  é um valor tabelado (LOWRY, 2014).

Neste trabalho decidimos não utilizar o teste KS, por considerarmos que este apresenta severas limitações quanto a sua performance. Na Figura D.1 mostramos um caso discutido no Capítulo 3, onde avaliamos a semelhança estatística entre duas distribuições por meio deste KS, encontrando um p-value de 0.04, o que significa que as distribuições empíricas são provenientes de distribuições distintas. No entanto, utilizamos neste trabalho 4 outras abordagens para o cálculo do p-value, das

quais todas resultaram em p-value superior a 0.05.

Diversos autores vêm enfatizando a limitação do teste KS para o propósito de avaliar semelhança estatística (FILION, 2015). No caso da Figura D.1 fica evidente a diferença entre não concordância local e global quanto as distribuições. Encontramos que ambas as distribuições possuem diferenças locais. A distribuição azul apresenta seu máximo em  $\sim 8$  Ga, enquanto a distribuição vermelha apresenta seu pico em  $\sim 9$  Ga. No entanto, no geral as distribuições se assemelham. A discordância entre os resultados do teste-KS e os outros quatro testes aqui utilizados vêm do fato de que as hipóteses implícitas no teste são incompatíveis com o objetivo do teste de semelhança estatística (FILION, 2015), gerando valores de p-values extremamente baixos para distribuições que globalmente são similares. Neste exemplo mostramos como o teste KS tende a priorizar diferenças locais à globais, por basear-se em distribuições cumulativas.

Figura D.1 - Distribuição de Idade da população estelar de galáxias de aglomerados  $d_{400+}$  e  $d_{400-}$ , apresentada em mais detalhes na Seção 3.5.





## APÊNDICE E - CÁLCULO DA VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS ANALISADOS

A caracterização do EFPA de aglomerados G e NG é feita por meio da comparação da porcentagem e dos parâmetros de população estelar de galáxias ocupando cada uma das regiões de Rhee. Em uma análise comparativa é de extrema importância entender a variância associada aos parâmetros considerados. A variância das porcentagens de galáxias em cada região é obtida a partir dos quartis da distribuição do percentual de galáxias nas mesmas para cada aglomerado, separando as populações em G e NG, AF e BF.

Dada sua natureza probabilística, demos especial atenção a variância dos parâmetros de população estelar de cada uma das regiões. A degenerescência criada por efeitos de projeção torna impossível definir regiões de forma absoluta, onde cada locus corresponda a somente uma única população. Logo, cada região também é caracterizada por uma alta variância, independente do parâmetro de população estelar analisado. Com o objetivo de ressaltar os parâmetros de população estelar relativos à população dominante em cada região, utilizamos aqui uma técnica de bootstrap, a qual consiste na reamostragem dos dados com o intuito de medir e aumentar a acurácia das medidas aqui tratadas. O uso dessa técnica fornece uma estimativa de variância relativa ao grupo dominante de cada região. A técnica de bootstrap é definida da seguinte forma: seja  $X = [x_i]_{i=1}^N$  o conjunto de medidas de um parâmetro em um determinado locus. Então o algoritmo seguido é

- Do conjunto X são selecionadas N medidas aleatoriamente, com reposição;
- Essas N medidas formam um novo conjunto X';
- É calculada a mediana do conjunto X';
- Esse processo é repetido k vezes;
- Utilizando o conjunto de k medianas, o desvio padrão é calculado partir dos quartis como  $\sigma_Q = 0.74(Q_{.75} - Q_{.25})$ ;

Aqui N corresponde ao número de galáxias na região, X corresponde ao parâmetro (idade, metalicidade ou massa estelar) que desejamos calcular a variância associada e utilizamos  $k = 1000$ . No algoritmo de bootstrap escolhemos calcular a mediana de cada conjunto formado por entender que trata-se de uma medida estatística que

evita flutuações. Dessa forma, garantimos que o erro associado a cada parâmetro de cada região seja calculado com respeito a população dominante.

## APÊNDICE F - INFLUÊNCIA DO CENTRO NO ESPAÇO DE FASE

O vínculo de  $R_{\text{proj}}$  com o centro do aglomerado impacta diretamente a distribuição de galáxias membro no EFP. Assim, utilizamos os 62 aglomerados com  $c_{\text{opt}}$  e  $c_{\text{rx}}$  definidos para estudar a influência dessa variável no EFP. Construímos EFPs considerando as duas estimativas de centro. Espera-se que em aglomerados nos quais a diferença entre as duas estimativas de centro ( $d_{\text{opt,rx}}$ ) é maior, sejam encontradas significativas alterações dinâmicas no sistema. Além disso, como discutido no Capítulo 2, a estimativa em raios X tende a representar melhor o poço de potencial do sistema, sendo menos sujeita a possíveis variações causadas por acreção de pequenos grupos através de filamentos e campo geral. Supõe-se que em sistemas com uma maior taxa de acreção, como aglomerados NG, as alterações na distribuição de galáxias no EFP devido a mudança do  $c_{\text{opt}}$  para o  $c_{\text{rx}}$  sejam mais evidentes.

As Figuras F.1 e F.2 mostram os EFPs de dois aglomerados, Yang 005 e Yang 008, respectivamente, construídos utilizando as duas estimativas de centro. Nas figuras demarcamos em tracejado a curva de velocidade de escape, que foi calculada seguindo a prescrição de Rhee et al. (2017) e adotando um perfil NFW para a distribuição de matéria escura. Notamos que para o caso de Yang 005 o uso dos centros óptico e em raios X implica em grande diferença na distribuição de galáxias no EFP. Notamos uma evidente falta de galáxias na região central quando utilizado o centro óptico, o que não corresponde ao que esperamos para um aglomerado, mesmo que fora do equilíbrio dinâmico. No entanto, o uso do centro em raios X resulta em uma distribuição mais homogênea no EFP. Yang 005 possui uma grande distância entre os centros ( $d_{\text{opt,rx}} = 937$  kpc) e é classificado como NG por dC17. Na Figura F.2, relativo ao aglomerado Yang 008, notamos pouca diferença entre as distribuições de galáxias no EFP e corresponde a um caso de pequena distância entre os centros ( $d_{\text{opt,rx}} = 164$  kpc).

Figura F.1 - EFP para o aglomerado Yang 005. Esquerda: utilizando o centro óptico; Direita: utilizando o centro de raios X. Este aglomerado é classificado como NG, segundo dC17. A linha pontilhada representa a velocidade de escape do sistema.

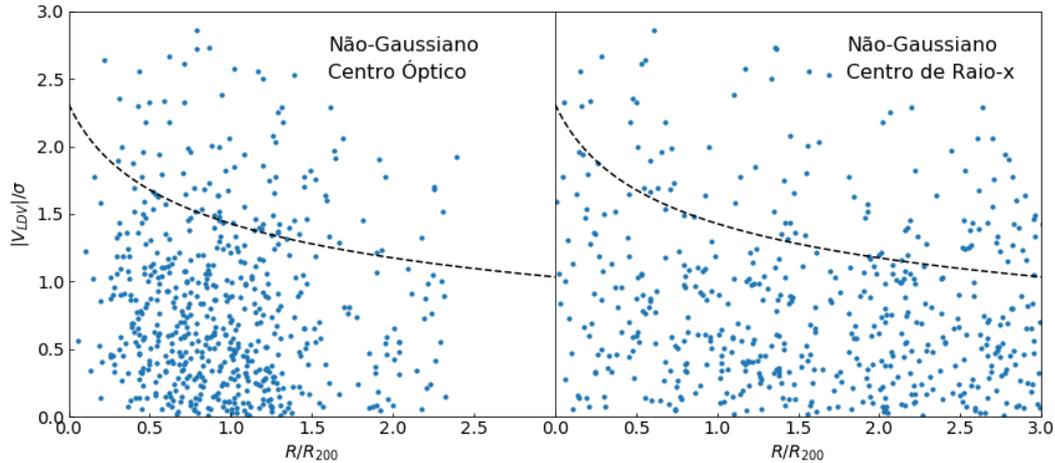
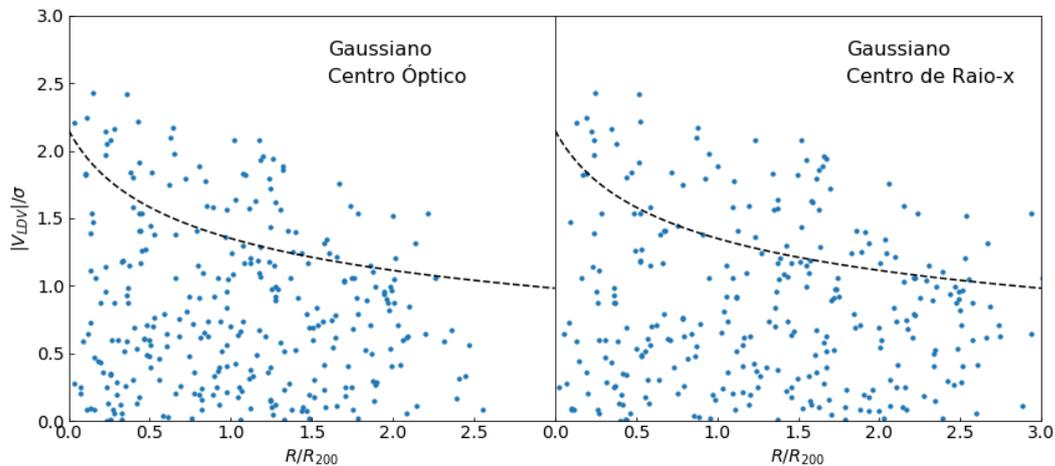


Figura F.2 - Semelhante a Figura F.1, mas para o aglomerado Yang 008. Este aglomerado é classificado como G segundo dC17.



Estes exemplos expressam a importância da escolha de uma estimativa de centro coerente para a construção do EFP. A análise feita sobre aglomerados individuais pode ser drasticamente afetada pela mudança de centro, a qual pode significar um viés nos resultados.

No entanto, ao considerarmos o EFPA de aglomerados G e NG, encontramos evidência de que os resultados até agora apresentados pouco variam com a estimativa

de centro utilizada. Apesar das galáxias ocuparem o EFPA de forma diferente, as tendências observadas para aglomerados G e NG não se alteram. A variação nos parâmetros de população estelar de cada região é em geral menor que os erros descritos no Capítulo 2, o que indica uma concordância entre os valores encontrados para Amostras 1 e 2. Assim, podemos considerar que há independência dos resultados com a amostra utilizada, o que indica que o centro óptico é uma boa aproximação do centro do sistema. Contudo, reiteramos que essa aproximação é válida somente quando a análise é feita sobre um número suficientemente grande de aglomerados.

O EFPA de aglomerados NG centrados em raios X apresentam características que refletem processos de acreção nesses sistemas. Encontramos um aumento no percentual de galáxias ocupando regiões centrais do EFPA de aglomerados NG quando utilizado o  $c_{rx}$ . A separação por bins radiais revela um aumento de 5 para 9% no caso AF e de 3 para 9% no caso BF na primeira partição. Esse aumento pode estar relacionado a processos de acreção em sistemas NG que deslocam o centro óptico do centro real do sistema. Assim, a distância entre os centros óptico e em raios X pode ser utilizado para caracterizar o estágio dinâmico do aglomerado.



## APÊNDICE G - USO DE $d_{\text{opt,rx}}$ COMO PARÂMETRO DE SEPARAÇÃO DE DOIS CONJUNTOS DE AGLOMERADOS

Neste Apêndice apresentamos em detalhes a caracterização do espaço AR vs DEC de dois aglomerados, Yang 005 (NG, segundo dC17) e Yang 008 (G), ilustrativos da motivação por trás do uso de  $d_{\text{opt,rx}}$  como parâmetro de separação de dois conjuntos de aglomerados. Escolhemos estes dois aglomerados por serem representativos do que foi observado na Amostra 2 quanto a comparação de aglomerados de maior (Yang 005,  $d_{\text{opt,rx}} = 937$  kpc) e menor (Yang 008,  $d_{\text{opt,rx}} = 164$  kpc) distância entre as duas estimativas de centro. A caracterização é feita por meio de um mapa de densidade de galáxias no espaço AR vs DEC e a observação em raios X do respectivo aglomerado. Apresentamos nas Figuras G.1 e G.2 o estudo sobre os sistemas mencionados e dentre as principais diferenças, destacamos:

- a) no caso de Yang 005 notamos dois máximos na distribuição de densidade de galáxias, um em  $\sim [AR = 247.1, DEC = 39.5]$  e outro próximo de  $[247.5, 40.5]$ . Já o aglomerado Yang 008 apresenta um único pico em densidade, próximo de  $[239.5, 27.2]$ ;
- b) a galáxia central, marcada pelo quadrado roxo no painel superior esquerdo, do sistema Yang 005 encontra-se afastada do centro óptico, porém próxima do centro em raios X. No caso do aglomerados Yang 008 a galáxia central está próxima tanto do centro óptico quanto do centro em raios X;
- c) quanto ao mapa em raios X, apesar de encontrarmos o centro em raios X centrado em um pico de emissão tanto para Yang 005 quanto Yang 008, no caso de Yang 005 notamos um segundo pico de emissão de tamanho e intensidade comparável com o qual  $c_{\text{rx}}$  localiza-se;

Interpretamos essas diferenças como um indício de que um grupo de galáxias está sendo acretado ao sistema Yang 008 e, portanto, este encontra-se em um estágio mais afastado do equilíbrio dinâmico quando comparado ao aglomerados Yang 005. Reiteramos que esses dois casos foram escolhidos por ilustrarem bem o observado na Amostra 2 como um todo e serem didáticos quanto a motivação por trás do uso de  $d_{\text{opt,rx}}$  como critério de separação de dois conjuntos de aglomerados em estágios dinâmicos distintos.

Figura G.1 - Estudo do espaço RA vs DEC para o aglomerado Yang 005.

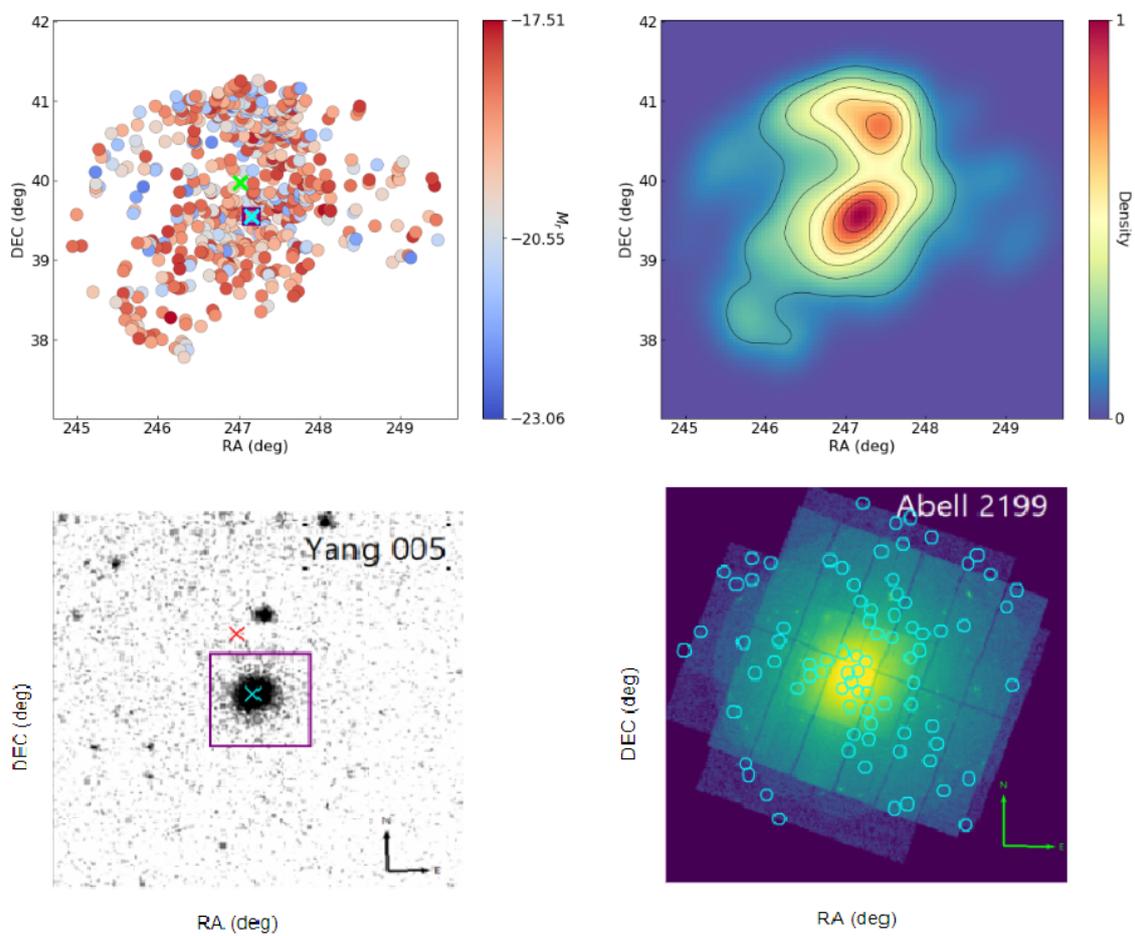
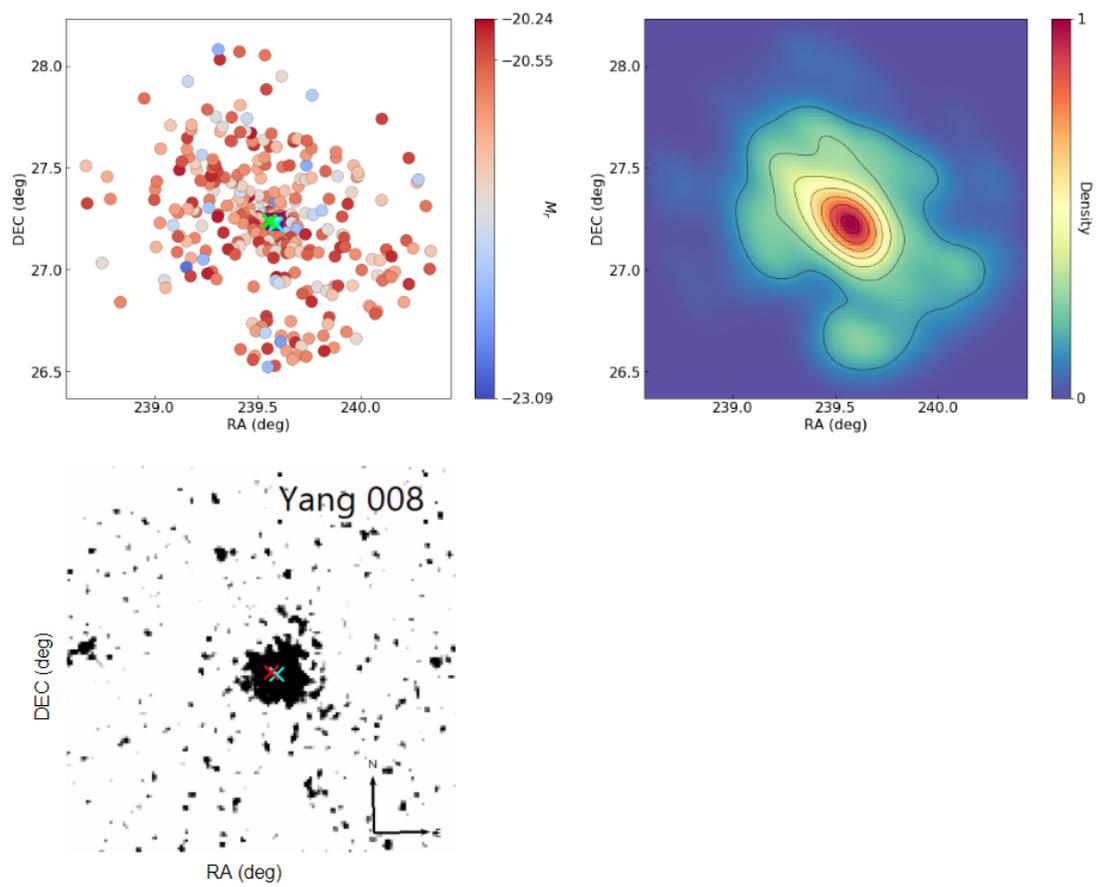


Figura G.2 - Os mesmo painéis apresentados na Figura G.1, mas para o aglomerado Yang 008. Nesse caso não há dados provenientes do levantamento XMM-Newton disponíveis.





**PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**