UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA OBSERVATÓRIO DO VALONGO

BUSCA POR INTERAÇÕES EM AGLOMERADOS DE GALÁXIAS NO ÓPTICO E EM RAIOS-X

Ana Carolina Costa Lourenço

 $\mathbf{2018}$



BUSCA POR INTERAÇÕES EM AGLOMERADOS DE GALÁXIAS NO ÓPTICO E EM RAIOS-X

ANA CAROLINA COSTA LOURENÇO Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Ciências - Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Afrânio Augusto Lopes **Coorientadora**: Dr^a. Laurie Anne Riguccini

> Rio de Janeiro Junho de 2018

Busca por interações em aglomerados de galáxias

no óptico e em raios -X

Ana Carolina Costa Lourenço

Dr. Paulo Afrânio Augusto Lopes (Orientador) Dra. Laurie Anne Riguccini (Co-orientadora)

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro -UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências - Astronomia.

Aprovada por:

Presidente, Dr. Paulo Afrânio Augusto Lopes- (Orientador) - OV/UFRJ

Dra. Laurie Anne Riguccini – (Co-orientadora) - OV/UFRJ

(A)

Dra. Tatiana Ferraz Laganá – (Avaliador Externo)- UNICSUL

Dr. Ricardo Lourenço Correia Ogando - (Avaliador Externo) ON/MCTIC

Dr. Ribamar Rondon de Rezende dos Reis - (Avaliador Interno) - IF e OV/UFRJ

Merce Grossi - (Avaliador Interno) - OV/UFRJ

Rio de Janeiro Junho de 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Lourenço, Ana Carolina Costa Busca por interações em aglomerados de galáxias no óptico e em raios-X. / Ana Carolina Costa Lourenço. -- Rio de Janeiro, 2018. 100 f.
Orientador: Paulo Afrânio Augusto Lopes. Coorientadora: Laurie Anne Riguccini. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo, Programa de Pós-Graduação em Astronomia, 2018.
1. Aglomerados de Galáxias. 2. Interações. 3. Subestruturas. 4. Ambiente. I. Lopes, Paulo Afrânio Augusto, orient. II. Riguccini, Laurie Anne, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Agradecimentos

Agradeço a todos os processos físicos que levaram à formação do Universo tal como ele é hoje e ao surgimento da Terra e da humanidade, mesmo que tais processos não se importem com meus agradecimentos. Agradeço a todas as ilusões e dificuldades que eu enfrentei na minha vida e que, de certa forma, me trouxeram até aqui. Agradeço aos acasos que levaram a humanidade a transmitir conhecimento por oralidade e escrita fazendo possível que hoje tenhamos registro das ideias dos grandes pensadores que passaram pelo mundo e contribuíram para a formação do nosso conhecimento do cosmos. Agradeço a todos os cientistas que dedicaram boa parte de suas vidas para construir o conhecimento que tornou possível o desenvolvimento desse trabalho, mesmo que muitas vezes tivessem que pagar com as suas vidas pelo que acreditavam. Agradeço a todos os anônimos que participaram da construção desse conhecimento de forma direta ou indireta.

Num aspecto mais pessoal, agradeço a minha família por todo apoio, carinho e suporte financeiro imprescindíveis para a realização deste trabalho. Aos que me ensinaram matemática e ciências, tio Quincas, tio Jorge, tio Inácio, muito obrigada. Ao meu irmão, João Paulo, por ter trazido os livros de Stephen Hawking e Carl Sagan para nossa casa durante a minha infância e ter me apoiado financeiramente durante o meu mestrado. Ao meu irmão João Francisco pelas correções dos meus textos. Ao meu irmão João Eduardo por sempre incentivar meu interesse pela astronomia e pelas observações em seu telescópio. As minhas irmãs Ana Cláudia e Ana Raquel por todo suporte quando viajei para o Canadá no inverno para participar do Ciências Sem Fronteiras. A minha tia Ana por sempre ter sido um exemplo de mulher independente e forte na qual eu busquei me espelhar e que me ajudou em vários momentos da minha vida, principalmente no meu mestrado. A tia Dora por sempre me doar os livros que eu precisava na minha infância. A tia Ceiça pelas conversas de cunho feminista que me fizeram mais forte. A meu avô Paulo por ter me introduzido a grandes filósofos na infância que influenciaram a maneira que eu penso e me comporto hoje. A minha prima Soraia por ter estudado e brincado comigo várias horas na infância. A todos os primos e tios que não citei individualmente, muito obrigada por todos os bons momentos, conhecimentos transmitidos e carinho. E em especial gostaria de agradecer aos meus pais, João e Suzana, por todo incentivo e afeto sem os quais eu não teria sobrevivido ao primeiro mês de vida. Obrigada por ter sempre mantido a casa cheia de livros e ter apoiado a minha decisão de seguir uma área completamente diferente das suas.

Agradeço também a todos os meus professores, em especial aos professores Josean Freire, Ramsés Nunes, Serguei Santos, Antonieta Nóbrega, Maria de Belém, Cleverson Filgueiras, Mario Assad (In memoriam), Maria Luisa Cescato, Edmundo Monte, Jayanne English, Jennifer West e Vladmir Ortega.

Agradeço a Tatiana Laganá por ter me guiado na redução e análise dos dados do XMM-Newton de forma tão atenciosa. Agradeço ao COSPAR pela oportunidade participar do workshop sobre redução e análise de dados em raios-X, por duas semanas, na Argentina. Agradeço à Coordenação de Pós-Graduação do Valongo por ter me concedido auxílio financeiro para realização de observação no Telescópio Blanco, no Chile e também para apresentação oral em conferência no Chile. Agradeço também à CAPES pelo apoio financeiro a este projeto.

Agradeço a todos os meus alunos que fizeram com que eu me sentisse útil e com os quais eu também aprendi muito. Muitas vezes quando as coisas não iam bem na minha vida acadêmica, o sucesso deles era suficiente para me animar e me dar forças. Agradeço aos meus amigos queridos que sempre me deram apoio psicológico para que eu seguisse em frente. Em especial Raisa Guglielmi, Raiana Nichols, Jiawei Huang, Douglas Rodrigues, Bruno Falcão e Andressa Guimarães. Aos meus ex-colegas de apartamento no Rio, obrigada por aturarem minha mania de limpeza e hábitos noturnos. Em especial quero agradecer à Adriana Maldonato e Mariana Horrisberger pelas noites de samba e domingos de praia. À Claudete Santos, Alaíde Gomes e Lúcia Santos por me ajudarem quando tive pneumonia e pela valiosa amizade. Riano Giribaldi e Luidhy Santana pela companhia e serviços de eletricistas, encanadores e técnicos de computadores. Agradeço as minhas amigas Tayane Machado e Kauanna Hino por me receberem tão bem durante o tempo que precisei ficar em São Paulo. Agradeço à Thalita Stevens e seus pais por me acolherem e me tratarem como família no Rio de Janeiro.

Agradeço a Cláudia e a Celeste por serem tão atenciosas comigo e me ajudarem sempre que eu precisei. Assim como ao Basílio, Alexandre e Jorge. Agradeço também aos guardas e aos demais funcionários do Valongo, em especial a seu Osvaldo por trazer mangas para mim.

Agradeço a todos os meus colegas que estudaram comigo e sofreram junto comigo, passando noites e mais noites acordados na minha casa, na Universidade ou no skype para fazer listas de exercícios e trabalhos. Em especial, Sebastian, Cynthia, Heidy, Jorge, Sérgio, Dailer e Rebeca. Nada disso seria possível sem vocês. Agradeço também aos meus colegas da astronomia que iam para as noites de reaggaeton comigo no Rio de Janeiro. Obrigada pela oportunidade de aprender mais sobre a cultura dos outros países da América Latina, hoje eu tenho um sentimento maior de integração latino-americana graças a vocês.

Agradeço a Bilica (In memorian), Ollie, Jasper, Monkey e todos os outros cachorros que alegraram a minha vida.

Ao meu namorado Jacob Carewick por todo amor e carinho sem os quais eu não teria forças para concluir o meu mestrado. Obrigada por estar sempre por perto nos momentos mais difíceis, mesmo morando a nove mil quilômetros de distância. Agradeço também a sua mãe Khandis Carewick por ter me alimentado maravilhosamente enquanto eu escrevia esta dissertação.

Por fim gostaria de agradecer aos meus orientadores Paulo Lopes e Laurie Riguccini por todas as correções, apoio, paciência e por tudo que eles me ensinaram.

Resumo

BUSCA POR INTERAÇÕES EM AGLOMERADOS DE GALÁXIAS NO ÓPTICO E EM RAIOS-X. Ana Carolina Costa Lourenço

Orientador: Prof. Dr. Paulo Afrânio Augusto Lopes **Coorientadora**: Dr^a. Laurie Anne Riguccini

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Astronomia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (Astronomia).

Neste trabalho buscamos evidências de interação e subestruturas em oito aglomerados de galáxias em baixo desvio para o vermelho (z < 0.1). Usamos dados fotométricos e espectroscópicos no óptico do Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Em raios-X temos a disponibilidade de dados do satélite XMM-Newton para cinco aglomerados e dados do Chandra para três aglomerados. Nós aplicamos o melust, um pacote do R que modela através de mistura de gaussianas para estimar densidades de probabilidade, identificando subaglomerações e seus respectivos membros em 1D (velocidade na linha de visada), 2D (plano do céu) e 3D (plano do céu e velocidade na linha de visada). Em seguida, calculamos os centroides para cada subgrupo que obtivemos a partir das análises do mclust para A1035 e A1291, suas dispersões de velocidade, R_{200} , M_{200} . Inspecionamos os dados em raios-X de toda a amostra para encontrar subestruturas e comparamos com as encontradas pelo *mclust*. Também obtivemos perfis de temperatura e metalicidade para quatro aglomerados da nossa amostra. Para alguns sistemas verificamos que não há interação, sendo aglomerados superpostos na linha de visada (ex. Abell 1035). Outros sistemas apresentam indícios de fusão a partir da análise óptica, combinada com a análise em raios-X (ex. Abell 2399).

PALAVRAS CHAVE: Aglomerados de Galáxias; Fusões; Subestruturas; Ambiente.

Abstract

SEARCHING FOR INTERACTING GALAXY CLUSTERS IN OPTICAL AND X-RAYS. Ana Carolina Costa Lourenço

Advisor: Prof. Dr. Paulo Afrânio Augusto Lopes Coadvisor: Dr^a. Laurie Anne Riguccini

Abstract da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Astronomia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (Astronomia).

In this work, we searched for evidence of interaction and substructure in 8 galaxy clusters in low redshift at z < 0.1. We used photometric and spectroscopic data from *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). In X-Rays, we have public XMM-Newton data for five clusters and Chandra data for three clusters. We applied *mclust*, an R package for Gaussian mixture modeling, to estimate probability densities, identifying subclusters and its members in 1D (velocity in the line of sight), 2D (plane of the sky) and 3D (plane of the sky and line of sight velocity). Then, we calculated the centroids of the modes we obtained through *mclust* analysis of A1035 and A1291, as long as their velocity dispersions, R_{200} , M_{200} . We inspected the X-Ray data of all sample to search for substructures and we compared with the ones found by *mclust*. We also obtained the temperature and metalicity profile of four clusters are superposed in the line of sight (Ex. Abell 1035). Other systems show traces of mergers from the combined analysis of optical and X-Rays (Ex. Abell 2399).

KEYWORDS: Galaxy clusters; Mergers; Substructures; Environment.

Lista de Figuras

1.1	Imagem XMM-Newton de Abell 3112. A barra de escala de 5' no canto	
	inferior direito mostra o comprimento correspondente a uma distância de	
	≈ 0.4 Mpc no aglomerado. (Bulbul et al., 2012)[18]	5
1.2	Diagrama de espaço de fases de 1000 partículas de uma aglomerado sintético	
	de Serra & Diaferio (2013)[89]	6
2.1	Método de seleção de aglomerados candidatos à interação a partir de análise	
	do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases	9
2.2	Distribuição de velocidades e diagrama de espaço de fases dos oito aglome-	
	rados da amostra final	11
2.3	Imagens dos 5 aglomerados da nossa amostra com dados públicos no ar- quivo do XMM-Newton. As imagens das câmeras EMOS1, EMOS2 e EPN foram combinadas com o comando merge do ESAS. Os contornos destacam as concentrações das emissões em raios-X do meio intraglomerado	16
2.4	Mapas de exposição de ZwCl 1215, à esquerda, e Abell 1377, à direita,	
	obtidos a partir de imagens do Chandra	17
3.1	Quarenta e cinco observações geradas num espaço bidimensional. As co- res representam três classes distintas encontradas através de aglomeração	
	hierárquica. Fonte: James et al. (2017) [43]	21
3.2	Painel da esquerda: Exemplo de dendograma gerado pela análise hierárquica	
	das observações mostradas na figura 3.1. Painel do centro: O mesmo den-	
	dograma do painel esquerdo com um corte na altura nove, resultando em	
	duas aglomerações distintas. Painel da direita: O mesmo dendograma do	
	painel esquerdo dessa vez com um corte na altura 5, resultando então nos 3 $$	
	grupos distintos que também são representados na figura 3.1. Fonte: James	
	et al. (2017) [43] $\dots \dots \dots$	21
3.3	Primeiro passo do algoritmo GMM.	23
3.4	Segundo passo do algoritmo GMM	23
3.5	Terceiro passo do algoritmo GMM	23
3.6	Quarto passo do algoritmo GMM.	23
3.7	Histograma de velocidades de A1035 com comparação entre análises do método KDE e do GMM.	24
3.8	Histograma de velocidades de A1035B	26
3.9	BIC dos dois modelos ajustados pelo <i>mclust</i> na análise unidimensional de	
	A1035B	26
3.10	Classificação de membros de A1035B obtida após análise unidimensional	
	do mclust	28
3.11	Incertezas para os membros de A1035B obtida após análise unidimensional	
	do <i>mclust</i> .	28
3.12	Densidade dos membros de A1035B obtida após análise unidimensional do	
	mclust.	29
3.13	Gráfico quantil-quantil dos membros de A1035B obtido após análise unidi-	
-	mensional do <i>mclust</i>	29
3.14	Classificação de membros de A1035B obtida após análise bidimensional do	2
	mclust.	30
3.15	Diagnóstico do BIC obtido após análise bidimensional de A1035B pelo mclust.	31

3.16	Gráfico em perspectiva do logaritmo da densidade obtido após análise bi- dimensional de A1035 polo <i>meluet</i>	30
317	BIC dos modelos ajustados pelo <i>melust</i> na análise tridimensional de A1035	32 33
3.18	Classificação de membros de A1035B obtida após análise tridimensional	00
0.10	pelo melust	34
3.19	Incertezas para os membros de A1035B obtida após análise tridimensional	01
0.10	do melust	35
3.20	Densidade dos membros de A1035B obtida após análise tridimensional do	00
0.20	melust	41
3.21	Nos paineis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	**
0.21	e a densidade dos membros de A1291A obtida pela análise unidimensional	
	do <i>mclust</i>	42
3.22	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	
0	e a densidade dos membros de A1291A obtida pela análise bidimensional	
	do melust	42
3.23	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	
0.20	e a densidade dos membros de A1291A obtida pela análise tridimensional	
	do melust	43
324	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	10
0.21	e a densidade dos membros de A1750 obtidas pela análise unidimensional	
	do melust	43
3.25	Em laranja temos a emissão em rajos-X de A1750. Os círculos verdes	10
0.20	representam a posição dos grupos encontrados pelo <i>melust</i> na análise bidi-	
	mensional de A1750	44
3 26	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	11
0.20	e a densidade dos membros de A1750 obtidas pela análise bidimensional	
	do melust	44
3.27	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	11
0.21	e a densidade dos membros de A1750 obtidas pela análise tridimensional	
	do melust	45
3 28	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	40
0.20	dos membros de A1377 e o BIC obtidos pela análise unidimensional do	
	melust	45
3 29	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	10
0.25	dos membros de A1377 e o BIC obtidos pela análise hidimensional do <i>melust</i>	46
3 30	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	10
0.00	dos membros de A1377 e o BIC obtidos pela análise tridimensional do <i>melust</i>	46
3 31	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a densidade	10
0.01	em escala de cores e a densidade em curvas de nível para A1377 obtidas na	
	análise tridimensional do <i>melust</i>	$\overline{47}$
3 32	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	тı
0.02	dos membros de A2067 e o BIC obtidos pela análise unidimensional do	
	meluet	47
2 22	Nos paináis da esquerda e da direita tomos respectivamente a classificação	-11
0.00	dos membros de A2067 e o BIC obtidos pela análise hidimensional do meluet	48
2 21	Nos paináis da esquerda a da diraita tomos respectivamente a classificação	-10
0.04	dos mombros do A2067 o o BIC obtidos polo apólico tridimonsional do molect	10
	uos memoros de A2007 e o DIO obtidos pera analise tridimensional do <i>mclust</i> .	40

3.35	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a densidade	
	em escara de cores e a densidade em curvas de mver para A2007 obtidas na	40
0.00	analise tridimensional do $mclust$	49
3.36	Classificação dos membros de NSCS J121723+040720 obtida pela analise	
	unidimensional do <i>mclust</i> .	49
3.37	Classificação dos membros de NSCS J121723+040720 obtida pela análise	
	bidimensional do <i>mclust</i>	50
3.38	Classificação dos membros de NSCS J121723 + 040720 obtida pela análise	
	tridimensional do <i>mclust</i>	50
3.39	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	
	dos membros de A2399 e o BIC obtidos pela análise unidimensional do	
	mclust.	51
3.40	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	
	dos membros de A2399 e o BIC obtidos pela análise bidimensional do <i>mclust</i> .	51
341	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação	01
0.11	dos membros de A2399 e o BIC obtidos pela análise tridimensional do <i>melust</i>	52
3 4 2	Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a densidade	02
0.12	om oscala do coros o a donsidado om curvas do nível para A2300 obtidas na	
	en escara de cores e a densidade em curvas de mver para A2555 obtidas na apólico tridimonsional do <i>meluet</i>	59
2 12	Classificação dos membros do Abell 2428 obtido polo apólico unidimensional	52
0.40	chassificação dos memoros de Aben 2428 obtida pera ananse unidimensionar	59
9.44	$\begin{array}{c} \text{do } mclust. \\ \text{c} \text{l} \text{c} \text{c} \text{c} \text{c} \text{c} \text{c} \text{c} c$	55
3.44	Classificação dos membros de Abell 2428 obtida pela analise bidimensional	~ 0
0.45	do $mclust$.	53
3.45	Classificação dos membros de Abell 2428 obtida pela análise tridimensional	
	do <i>mclust</i>	54
4.1	Perfil de temperatura e metalicidade para Abell 1035B (norte) e Abell	
	1035A (sul)	60
4.2	Regiões anulares utilizadas para extrair os perfis de temperatura e metali-	
	cidade para Abell 1035N e S. As regiões circulares pretas foram excluídas .	61
4.3	Perfil de temperatura e metalicidade para Abell 1750 norte e central	62
4.4	Regiões anulares utilizadas para extrair os perfis de temperatura e metali-	
	cidade para Abell 1750N e C. As regiões circulares pretas foram excluídas .	63
4.5	Mapa de temperatura de Lakhchaura & Singh (2004) para A1377 com	
	dados do Chandra	63
4.6	Perfis de temperatura de A2061 e A2067 à esquerda e à direita, respecti-	
	vamente. Dados de Marini et al. (2004)	64
4.7	Nos paineis da esquerda e da direita temos respectivamente os perfis de	
	temperatura e metalicidade de ZwCl 1215 obtidos em Hoffer et al. (2012).	65
4.8	Perfis de temperatura e metalicidade para Abell 2399 e Abell 2428.	66
4.9	Regiões anulares utilizadas para extrair os perfis de temperatura e metali-	
	cidade para Abell 2399. As regiões circulares verdes foram excluídas	67
4.10	Regiões anulares utilizadas para extrair os perfis de temperatura e metali-	
	cidade para Abell 2428. As regiões circulares pretas foram excluídas	67
4 11	Os círculos abertos azuis estão associadas à emissão sul de A1035A. Os	0.
10 I I	quadrados abertos verdes estão associados à emissão norte de A1035R. O	
	círculo e quadrado abertos e em ciano representam as galávias associadas	
	ao pico de emissão do reio-X	60
		09

4.12	Os quadrados abertos verdes e os círculos abertos azuis representam os dois modos de velocidade encontrados pelo <i>mclust</i> para A1291. A seta vermelha	
	aponta para galáxia próxima ao pico da emissão em raios-X	70
4 13	O <i>mclust</i> encontrol quatro grupos na análise 3D desse aglomerado, sendo as	10
4.10	eruzes aguis associadas a A1750C a os círculos abortos brancos associados	
	cituzes azuis associadas a A1750C e os circulos abertos brancos associados	
	a A1750N. A cluz e o circulo aberto em vermento representam as duas	71
4 1 4	galaxias proximas aos picos em raios-A desses agiomerados	(1
4.14	A imagem mostra a emissão do gas de Abell 1377 capturada com um dos	
	detectores ACIS-S do Chandra. O grupo de circulos abertos rosa é o que	
	está associado à emissão em raios-X.	72
4.15	Imagem do ROSAT para ilustrar a associação do óptico com a distribuição	
	do ICM de A2067. As diferentes cores representam cada um dos grupos	
	encontrados pelo <i>mclust</i>	73
4.16	Os quadrados abertos verdes representam o aglomerado encontrado mais	
	ao sul de NSCS J121723+040720, ZwCl 1215. A região vermelha mostra a	
	galáxia próxima ao pico de luminosidade em raios-X	74
4.17	Figura com a região inteira de ZwCl 1215	75
4.18	As setas vermelhas apontam para as galáxias próximas aos dois picos de lu-	
	minosidade em raios-X. O grupo de círculos abertos rosa aparece associado	
	a distribuição do ICM de A2399.	76
4.19	Figura com a região inteira de A2399.	77
4.20	O grupo de círculos abertos azuis aparece associado com a distribuição	
	do gás de A2428. A galáxia próxima ao pico de luminosidade do gás não	
	aparece em nossos dados.	78
4.21	Figura com a região inteira de A2428	79
5.1	Gráfico de luminosidade em raios-X versus temperatura. A reta em verme-	10
0.1	lho corresponde ao modelo linear ajustado aos valores Lopes et al. (2009)	
	A reta em azul mostra o ajuste para os valores de temperatura média ob-	
	tidas pelos perfis de temperatura do XMM-Newton	81
59	Cráfico de luminosidado vorsus tomporatura om raios X somelhanto ao an	01
0.2	torior mag dossa voz ovalujada A 2200	ຈາ
Λ 1	Poriões apulares utilizadas para extrair o <i>background</i> do A1025. das cômoras	62
A.1	MOS em siene a DN em agul accure. As negiões sinculares undes sõ	
	MOS, em ciano e PIN em azur escuro. As regiões circulares verdes são as	00
1.0		80
A.2	Regiões anulares utilizadas para extrair o <i>background</i> , de A1291, das cameras	
	MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares pretas são as	~
	tontes excluidas.	87
A.3	Regiões anulares utilizadas para extrair o <i>background</i> , de A1750, das câmeras	
	MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares pretas são as	
	fontes excluídas	88
A.4	Regiões anulares utilizadas para extrair o <i>background</i> , de A2399, das câmeras	
	MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares verdes são as	
	fontes excluídas	89
A.5	Regiões anulares utilizadas para extrair o $background,$ de A2428, das câmeras	
	MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares pretas são as	
	fontes excluídas.	90

Lista de Tabelas

2.1	Amostra com os 12 aglomerados e seus dados disponíveis em raios-X	10
2.2	Informações sobre as observações da amostra disponíveis na plataforma do	
	XMM-Newton.	15
2.3	Comparações entre os satélites mais importantes em raios-X	16
3.1	Modelos ajustados pelo <i>mclust</i> . O "x"na terceira e quarta colunas repre-	
	senta a disponibilidade do modelo em <i>Cluster</i> Hierárquico (HC) e Maxi-	
	mização da Expectativa (EM).	25
3.2	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise unidimensional de A1035B	27
3.3	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise bidimensional de A1035B	30
3.4	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise tridimensional de A1035B	31
3.5	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise unidimensional de A1291A	32
3.6	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise bidimensional de A1291A	33
3.7	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise tridimensional de A1291A	36
3.8	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise unidimensional de A1750	36
3.9	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise bidimensional de A1750	37
3.10	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise tridimensional de A1750	37
3.11	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise unidimensional de A1377	38
3.12	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise bidimensional de A1377	38
3.13	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise tridimensional de A1377	39
3.14	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise unidimensional de A2067	39
3.15	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise bidimensional de A2067	40
3.16	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise tridimensional de A2067	40
3.17	Parâmetros obtidos pelo $mclust$ na análise unidimensional de NSCS J121723	
	$+ 040720. \dots \dots$	40
3.18	Parâmetros obtidos pelo $mclust$ na análise bidimensional de NSCS J121723	
	$+ 040720. \dots \dots$	40
3.19	Parâmetros obtidos pelo $mclust$ na análise tridimensional de NSCS J121723	
	$+ 040720. \dots \dots$	41
3.20	Parâmetros obtidos pelo $mclust$ na análise unidimensional de Abell 2399	42
3.21	Parâmetros obtidos pelo $mclust$ na análise bidimensional de Abell 2399	43
3.22	Parâmetros obtidos pelo $mclust$ na análise tridimensional de Abell 2399	45
3.23	Parâmetros obtidos pelo $mclust$ na análise unidimensional de Abell 2428	46
3.24	Parâmetros obtidos pelo $mclust$ na análise bidimensional de Abell 2428	48
3.25	Parâmetros obtidos pelo <i>mclust</i> na análise tridimensional de Abell 2428	51
4.1	Instrumentos, colunas de densidades hidrogênio e tempos de exposição re-	
	sultantes após a redução das imagens	58
4.2	Informações contidas no MCXC para os aglomerados da nossa amostra	58
4.3	Informações contidas em Lopes et al. (2009) para os aglomerados da nossa	
	amostra	59
5.1	Quantidade de modos em raios-X comparada com quantidade de modos	
	obtida pela análise 3D do <i>mclust</i>	84
5.2	Tipo BM comparado com as temperaturas e metalicidades médias	84

Sumário

1	Intr	odução	1
	1.1	Aglomerados de galáxias e a importância da identificação de suas subes-	
		truturas	1
	1.2	Distribuição espacial das galáxias.	2
	1.3	O meio intraglomerado	3
		1.3.1 Região central do ICM	4
	1.4	O diagrama de espaço de fases	5
	1.5	Subestruturas e propriedades galácticas.	6
	1.6	Estrutura da dissertação.	7
2	Am	ostra	8
	2.1	Catálogo NoSOCS.	8
	2.2	Seleção dos aglomerados cadidatos a interação.	8
	2.3	Dados no óptico (SDSS)	10
	2.4	Dados em raios-X	15
	2.5	Dados complementares em raios-X	15
	2.6	Revisão literária	18
0			
3	Ana	lise no optico com o MCLUST	20
	3.1	Tecnicas de <i>clustering</i>	20
	3.2	MCLUST: Um modelo de mistura de gaussianas	24
	3.3	Analise de cada aglomerado em 1D, 2D e 3D	25
		3.3.1 Abell 1035B	27
		3.3.2 Abell 1291A	30
		3.3.3 Abell 1750	32
		3.3.4 Abell 1377	34
		3.3.5 Abell 2067	36
		$3.3.6 \text{ NSCS J121723} + 040720 \dots \dots$	37
		3.3.7 Abell 2399	38
		3.3.8 Abell 2428	39
4	Aná	lise em raios-X	55
	4.1	Download e redução dos dados e obtenção de parâmetros físicos	55
	4.2	Análise das temperaturas e metalicidades do ICM.	57
	4.3	Comparação entre a distribuição do ICM e a análise do óptico em 3D	68
5	Con	clusão	80
0	5.1	Perspectivas	84
	0.1	1015p001/45	04
Α	Reg	iões utilizadas para extrair o <i>background</i> e produzir os perfis.	86
в	Res	ultados para cada modo isolado em A1035 e A1291.	91

1 Introdução

Nosso principal objetivo de pesquisa é verificar se os aglomerados de galáxias, candidatos à interação, realmente estão interagindo e indicar qual o estado dinâmico mais provável através da análise da imagem em raios-X e da distribuição de galáxias. Esse trabalho é fundamental para entender como a taxa de formação estelar (SFR) de uma galáxia é influenciada pelas interações entre aglomerados e pelo ambiente ao qual ela pertence. Definir regiões de interação entre aglomerados, estimar a densidade de galáxias e estudar a emissão em raios-X vai nos fornecer dados essenciais para identificar alguns dos processos físicos mais importantes no cessamento da formação estelar em aglomerados de galáxias.

1.1 Aglomerados de galáxias e a importância da identificação de suas subestruturas.

De acordo com o modelo hierárquico de formação de estruturas, os aglomerados de galáxias são as maiores estruturas do Universo que estão gravitacionalmente ligadas. Isto faz deles uma ferramenta importante na determinação de parâmetros cosmológicos como Ω_m , $\Omega_\lambda \in \sigma_8$. O modelo hierárquico é o mais aceito atualmente para explicar a formação das estruturas observadas no Universo. Nesse modelo as estruturas menores se formaram primeiro e foram se aglomerando para formar os objetos maiores observados hoje. Isso explica o porquê de uma grande parte dos aglomerados observados em Universo local não está em equilíbrio (Baier, 1983, Mohr et al., 1993, Bird, 1994, Eckert et al., 2011)[7][65][11][26].

Grandes levantamentos como o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) (York et al., 2000) [99] e o 2dF *Galaxy Redshift Survey* (2dF) (Folkes et al., 1999)[32] obtiveram dados no óptico que ajudaram a mapear a distribuição tridimensional de matéria no Universo. Com o advento das grandes simulações cosmológicas, tais como Millennium surgiu uma nova forma de se estudar a precisão dos modelos cosmológicos buscando discrepâncias entre os resultados das simulações e os resultados dos grandes levantamentos (Nurmi et al., 2013).[71] As simulações cosmológicas tem nos ajudado a entender como a distribuição de massa foi se organizando até ficar da forma que observamos hoje. Assim como os mapas 3D fornecidos pelos grandes levantamentos, as simulações nos mostram que a distribuição espacial da matéria é uniforme a partir de uma escala de 100 Mpc, mas apresentam regiões de sobredensidade e de vazios quando observamos numa escala de 10 Mpc. As simulações também conseguem reproduzir bem as regiões filamentares da distribuição de massa que são observadas no Universo em grande escala.

A partir do estudo e do cálculo da massa dos aglomerados de galáxias é possível se restringir parâmetros cosmológicos já mencionados, Ω_m , Ω_λ e σ_8 . Existem diversas formas de se calcular as massas dos aglomerados de galáxias: massa do virial (Zwicky, 1933; Biviano et al., 2006; Barrena et al., 2012)[100][13][8], raios-X (Cowie et al., 1987; Voit, 2005; Ettori et al., 2013)[19] [98] [29], efeito Sunyaev-Zel'dovich (ESZ) (Grego et al., 2001)[35] e lentes gravitacionais fracas e fortes (Tyson et al., 1990; Cacciato et al. 2006; Limousin et al. 2007a; Merten et al. 2009; Hoekstra et al., 2013)[96] [39]. Cada um desses métodos apresenta vantagens e desvantagens. A presença de subestruturas afeta a estimativa de massa de todos os métodos listados que presumem o equilíbrio do aglomerado. O único que não assume essa hipótese é o método de lentes gravitacionais. No entanto esse método só possui uma boa resolução na região mais central do aglomerado, pois ele é sensível a toda massa projetada na linha de visada. Por tal motivo é importante que as subestruturas sejam identificadas e quantificadas para que a estimativa de massa seja aprimorada nos três primeiros métodos.

Alguns trabalhos também sugerem que subestruturas aumentam o espalhamento nas relações de escala (Ruppin et al., 2017)[85]. Em Lopes et al. (2006)[56] os autores concluíram que a relação T_x - N_{gals} ou T_x - L_{opt} é muito afetada pela presença de subestruturas, mas as relações de escala envolvendo L_x não são. Ruppin et al. (2017)[85] mostraram que a identificação de subestruturas e remoção das mesmas num aglomerado observado através de efeito Sunyaev-Zel'dovich melhorou significativamente a estimativa da massa.

Em Rowley et al. (2004)[84] os autores mostraram que a relação de escala L_x - T_x , onde normalmente a luminosidade em raios-X cresce proporcionalmente com a temperatura, é influenciada pelas fusões de aglomerados de forma um tanto quanto complexa. Vários tipos diferentes de flutuações de luminosidade e temperatura de curto prazo associadas a grandes fusões foram identificados, incluindo fusões de pico duplo nas quais o meio intraglomerado mescla primeiro globalmente, causando aumento de L_x e T_x ao mesmo tempo, e depois os núcleos do aglomerado mesclam e então L_x aumenta e T_x diminui. As subestruturas, portanto, possuem uma influência nas relações de escala que ainda precisa ser melhor compreendida para a obtenção de um melhor refinamento nos parâmetros cosmológicos.

1.2 Distribuição espacial das galáxias.

Abell (1958)[2] identificou visualmente milhares de aglomerados de galáxias nas placas do *Palomar Observatory Sky Survey* (POSS). Naquele tempo já foi possível que ele concluísse através de análise estatística da distribuição dos aglomerados, que existem também aglomerados de aglomerados de galáxias, estes são conhecidos hoje em dia como superaglomerados. Quase vinte anos depois, Turner & Gott (1976)[94] usaram um algoritmo de *clustering* aglomerativo baseado em "ligação única" para identificar grupos de galáxias, esse método usava a separação angular para identificar membros nas regiões de densidade mais elevada. No entanto essa técnica não levava em consideração o fato de que a separação angular projetada entre as galáxias depende do desvio para o vermelho e portanto grupos locais com alta separação angular não eram identificados. Mais tarde Huchra & Geller (1982)[42] fizeram uma análise similar, mas que incluía o desvio para o vermelho e portanto não sofria do mesmo problema. Esse método ficou conhecido como *Friends of Friends* e hoje é largamente usado na astronomia.

Os primeiros estudos sobre os agrupamentos tratavam as aglomerações de galáxia de forma isotrópica, mas isso mudou após os grandes levantamentos de desvio para o vermelho. A medida que a quantidade de dados aumentou, se percebeu que a distribuição espacial das galáxias não segue a distribuição de Poisson, que é esperada numa distribuição espacial aleatória. Os desvios para o vermelho passaram a ser utilizados como aproximação de uma terceira coordenada espacial. Com o SDSS os desvios para o vermelho de mais de 2 milhões de galáxias foram obtidos. O mapa 3D criado mostra que os superaglomerados na verdade são interseções de filamentos e grandes paredes de galáxias ao redor dos espaços "vazios". Por causa disso, é difícil dizer até que ponto, em larga escala, os modelos de mistura de gaussianas são eficientes na busca de aglomerados (Kunh & Feilgeson, 2017)[47]. No entanto, numa escala menor, sabe-se que as galáxias que pertencem a um aglomerado relaxado, tendem a seguir uma distribuição gaussiana.

Mais a frente no capítulo 3, apresentaremos algumas técnicas de *clustering* que po-

dem ser utilizadas para a identificação de aglomerados de galáxias, como o *clustering* hierárquico e o *k-means*. Neste trabalho nós procuramos por interações, subestruturas e multimodalidade com um modelo de mistura de gaussianas, de maneira não supervisionada, isto é, sem especificar o número de componentes a ser encontrado. Selecionamos uma amostra de aglomerados visualmente a partir da inspeção dos histogramas de velocidade e diagramas de espaço de fases. Esse processo será melhor explicado no capítulo 2. Esperávamos que para essa amostra que já apresentava sinais de multimodalidade na análise visual, o modelo ajustasse mais de uma gaussiana nas análises 1D, 2D e 3D. Os resultados dessas análises serão discutidos no capítulo 3. Alguns autores já vem aplicando modelos de mistura de gaussianas na astronomia. Einasto et al. (2010)[27] utilizaram um modelo de misturas de gaussianas, o *mclust*, para analisar a distribuição de velocidade peculiares nos aglomerados mais ricos do *Sloan Great Wall* e encontraram que todos eles possuem subestruturas. Em Ribeiro et al. (2013)[81], os autores verificaram que o *mclust* é a melhor escolha de código para procurar por multimodalidade em grupos com mais de 20 membros. No capítulo 3, explicaremos em mais detalhes como o *mclust* funciona.

1.3 O meio intraglomerado

No domínio óptico, os aglomerados de galáxias são identificados como regiões de sobredensidade de galáxias com respeito à média geral. Eles contém até milhares de galáxias movendo-se num poço de potencial gravitacional em comum que também aprisiona uma grande quantidade de gás quente $(10^7 \text{ K} - 10^8 \text{ K})$ que preenche o espaço entre as galáxias. Apesar de ser difuso, o gás intraglomerado (ICM), é uma fonte poderosa de raios-X e constitui cerca de 11% da massa total do aglomerado. Bahcall (1977b)[6] apresentou uma correlação entre a luminosidade em raios-X dos aglomerados e o parâmetro de densidade de galáxia central projetado. Uma possível explicação para isso é o fato de que a emissão térmica em raios-X cresce com o quadrado da densidade do gás, e portanto é muito mais sensível a porção mais profunda do poço de potencial gravitacional do que às partes mais externas do aglomerado.

A densidade de galáxias tende a aumentar nas regiões mais centrais dos aglomerados e galáxias elípticas tendem a ser encontradas nessas regiões, enquanto que as espirais tendem a se localizar nas regiões mais externas e menos densas. Esta é conhecida como a relação morfologia-densidade (Dressler, 1980; Houghton, 2015)[25][41]. Ao contrário das espirais, as galáxias elípticas tem baixa taxa de formação estelar. Até agora, permanece incerto quais são os mecanismos físicos dominantes que são responsáveis por causar o cessamento da formação estelar (SF) nas galáxias que se encontram nas regiões mais densas dos aglomerados. Diversas hipóteses foram formuladas na tentativa de resolver o problema, algumas delas dependem do ambiente, por exemplo, pressão de arraste (Gun & Gott, 1972; Simpson et al., 2018)[36][90], assédio de galáxias (Moore et al., 1996)[66], fusão de galáxias (Mihos, 1995; Shapiro et al., 2010)[64], estrangulamento (Peng et al., 2015)[73]. Aglomerados de galáxias ricos são laboratórios bastante efetivos para o estudo da influência do ambiente nas propriedades das galáxias (Ex. Lopes et al., 2014)[59]. Eles também nos oferecem a oportunidade de reunir amostras numa ampla gama de densidades de galáxias, ou densidades de gás intraglomerado. Muitas vezes subestruturas com densidade muito acima da média global do aglomerado causam desvios em relações como a de morfologia-densidade. Numa análise extra que foi feita num dos aglomerados da nossa amostra, A2067, mas não foi incluída nesse trabalho, encontramos regiões em raios mais externos, onde a taxa de formação estelar era mais baixa do que o esperado

para galáxias que ainda estão sendo agregadas ao aglomerado. Depois de uma análise mais cuidadosa, encontramos que essa região é uma subestrutura, com densidade maior do que a densidade média do aglomerado. Essa subestrutura também possui emissão em raios-X. Um dos possíveis desdobramentos futuros desse trabalho é comparar o efeito da densidade local com o efeito do ICM sobre a taxa de formação estelar.

A origem do ICM ainda é um tema em aberto na comunidade científica. Uma corrente sugere que ele foi todo ejetado de galáxias, enquanto outra diz que ele teve origem primordial, não tendo sido proveniente dos processos de nucleossíntese que ocorrem no interior das estrelas, mas sim da formação dos primeiros elementos químicos do Universo após o *Big Bang.* A construção de telescópios em raios-X permitiu o estudo da metalicidade do gás e foi observado que ela varia na faixa de $0.3 Z_{\odot}$ a $0.5 Z_{\odot}$ (Mushotzky, 1996)[67] para a maioria dos aglomerados, sugerindo que o gás também foi enriquecido por mecanismos como jatos de *Active Galactic Nuclei* (AGN), remanescentes de supernova e colisões de estrelas de nêutrons (Abbott et al., 2017)[1]. Mais recentemente, observações com melhor resolução espacial mostraram que a metalicidade em aglomerados próximos muitas vezes tem um pico no centro e decresce para ~ $0.3 Z_{\odot}$ nas regiões mais externas (Allen & Fabian, 1998; De Grandi et al., 2004; Leccardi & Molendi, 2008; Mantz et al., 2017)[3][21][50][61].

Até mesmo aglomerados considerados em equilíbrio como o aglomerado de coma, apresentam regiões de interação e subestrutura (Forman et al., 1981)[33]. Com o aparecimento de telescópios com alta resolução em raios-X, como o XMM-Newton e o Chandra, percebeu-se que a distribuição do gás intraglomerado era muitas vezes pouco simétrica e a presença de subestruturas no gás não era algo tão incomum como se pensava.

Além da análise visual da imagem, é possível aplicar diferentes técnicas para identificação de subestruturas em raios-X. Durante as interações, o choque entre os ICM's aumenta a pressão na região do impacto e isso causa um aumento de temperatura. Portanto, procurar por regiões de aumento de temperatura no gás através de perfis ou mapas de temperatura é uma forma de se identificar as regiões de interação.

1.3.1 Região central do ICM

Observações em raios-X na década de 70 mostraram que o ICM no centro de muitos aglomerados era tão denso que o tempo de resfriamento do gás era muito menor que o tempo de Hubble. Isso acabou levando ao desenvolvimento do modelo de *cooling flow*, que basicamente, prevê o resfriamento do gás nas regiões centrais e mais densas do ICM pela emissão em raios-X. Após o resfriamento, o ICM perderia suporte pela pressão na região central e o gás mais quente das regiões vizinhas ao centro cairia em direção ao núcleo, resfriando também. No entanto, as taxas teóricas de resfriamento dos modelos clássicos de cooling flow alcançariam valores de ~ $1000 M_{\odot} yr^{-1}$ (Fabian, 1994)[30], que estão bem distantes do que foi deduzido a partir de observações do XMM-Newton (Peterson et al., 2003; Sanders et al., 2008) [74] [86]. Outra consequência do modelo de cooling flow seria o acúmulo de gás frio no centro do aglomerado. Isto causaria um pico acentuado no perfil de brilho superficial do aglomerado e um aumento na taxa de formação estelar na região central. Ambos os efeitos não tem suporte observacional. Esta discrepância levou à inclusão de mecanismos de aquecimento no modelo do *cooling flow*. Alguns desses mecanismos estão relacionados com o *feedback* de AGN's. A queda e a acresção do gás frio no buraco negro supermassivo no centro do aglomerado (SMBH) alimentaria as explosões de AGN's que mantém o ICM em equilíbrio térmico global (Pizzolato & Soker, 2005). O processo de *feedback* tem obtido sucesso em simulações cosmológicas. Hoje em dia, as simulações hidrodinâmicas são capazes de reproduzir as propriedades observadas nos

núcleos frios dos aglomerados (Li et al., 2015; Prasad et al., 2015)[52][78]. No entanto, a dificuldade em se observar o *cooling flow* tem feito com que a nomenclatura utilizada na literatura seja substituída por aglomerados *cool core* (CC) e aglomerados não *cool core* (NCC). A definição de aglomerados CC não tem a ver com algum fluxo de gás frio no centro, eles são simplesmente aglomerados onde a temperatura do centro é mais baixa do que a média total. Os aglomerados *cool core* são dinamicamente mais estáveis do que os que não são *cool core*. Eles possuem uma galáxia dominante no centro (cD), o que indica que existe uma relação entre essa galáxia e a temperatura do núcleo. Para exemplificar o caso de um aglomerado dinamicamente estável, acrescentamos a imagem de um aglomerado que não faz parte da nossa amostra Abell 3112. Este foi classificado como *cool core* por Bulbul et al. (2012)[18]. A figura 1.1 mostra a imagem obtida pelo XMM-Newton para Abell 3112, nela podemos perceber como o aglomerado é simétrico e bem concentrado.



Figura 1.1: Imagem XMM-Newton de Abell 3112. A barra de escala de 5' no canto inferior direito mostra o comprimento correspondente a uma distância de ≈ 0.4 Mpc no aglomerado. (Bulbul et al., 2012)[18]

1.4 O diagrama de espaço de fases

As galáxias passam por regiões de diferentes densidades enquanto percorrem seus caminhos através dos aglomerados. No entanto, esse caminho percorrido não pode ser observado já que as escalas de tempo para se observar tais mudanças são muito grandes. Para se ter uma ideia do que acontece com as galáxias ao longo do raio dos aglomerados, utilizamos então o diagrama de espaço de fases, que é um gráfico que mostra a velocidade na linha de visada relativa ao centro do aglomerado contra o raio do mesmo.

Num diagrama de espaço de fases as galáxias que estão na parte virializada do aglomerado se localizam numa região em forma de bico, enquanto que as galáxias que ainda não atingiram o equilíbrio ficam fora dessa região. Dessa forma, utilizando esse tipo de diagrama, é possível reduzir os espalhamentos nas relações que levam em consideração o ambiente onde a galáxia se encontra, pois com o uso desse diagrama, podemos reduzir os efeitos de projeção causados por galáxias que se encontram à frente ou no fundo dos aglomerados.

Na figura 1.2 temos um exemplo de diagrama de espaço de fases de Serra & Diaferio (2013)[89]. Os círculos preenchidos azuis mostram as galáxias que estão ligadas gravitacionalmente ao aglomerado. Os losangos preenchidos pretos são os membros intrusos ou *interlopers*. A linha preta que identifica o perfil da velocidade de escape do aglomerado é conhecida como cáustica. As barras de erro são de 1σ . A linha preta corresponde à cáustica estimada através de simulação e a linha ciano corresponde a cáustica verdadeira.



Figura 1.2: Diagrama de espaço de fases de 1000 partículas de uma aglomerado sintético de Serra & Diaferio (2013)[89]

O diagrama de espaço de fases facilita o estudo de propriedades galácticas como por exemplo morfologia (Biviano et al., 2002)[12], distribuição espacial de AGN's (Haines et al., 2012)[37], distribuição espacial de galáxias pós surto de formação estelar (Muzzin et al., 2014)[68], distribuição de cores (Crawford et al., 2014)[20], distribuição da taxa de formação estelar (Hernández-Fernández et al., 2014)[38], entre outras. Ele é, portanto, de fundamental importância para o entendimento das relações observadas nos aglomerados de galáxias. No nosso trabalho, o diagrama de espaço de fases foi utilizado para identificar possíveis subestruturas. Futuramente, pretendemos utilizar essa ferramenta para estudar a distribuição da taxa de formação estelar em nossa amostra.

1.5 Subestruturas e propriedades galácticas.

Como vimos até agora, o ambiente local está relacionado com algumas propriedades galácticas, tais como, taxa de formação estelar e morfologia. Riguccini et al. (2015) [82] estudaram uma população de galáxias lenticulares com alta taxa de formação estelar de acordo com seus altos fluxos em MIR/NIR (Galáxias realçadas no IR-Médio ou MIEGs). A maioria das MIEGs no aglomerado de Coma foram encontradas numa região em que o ICM está em processo de fusão. Isso sugere uma possível relação entre a taxa de formação estelar e a região de interação do ICM. Por outro lado, Mauduit & Mamon (2007)[63] mostraram que a baixa taxa de formação estelar em galáxias com emissão em rádio numa região num raio de 10 Mpc no centro do Superaglomerado Shapley pode ser atribuída à fusão de aglomerados que causou a destruição do *cool core* e interrompeu o abastecimento de gás dos núcleos ativos de galáxias (AGN). Eles demonstram que a baixa emissão em rádio das galáxias que não são as galáxias mais brilhantes do aglomerado (BCG), não pode ser explicada por fusões de galáxias ou por colisões *flyby*¹, mas pela perda de gás através do aumento da pressão de arraste nas regiões de choque do ICM. Devido ao pouco conhecimento de como as interações entre os aglomerados influenciam na taxa de formação estelar se faz então necessário um estudo aprofundado das relações entre os ICMs em diferentes estados dinâmicos, levando em consideração propriedades como temperatura, pressão, densidade do gás, densidade local de galáxias e a taxa de formação estelar. Por tal motivo, um dos objetivos futuros do nosso trabalho é procurar por evidências de alteração na taxa de formação estelar específica das galáxias em regiões de choque do ICM.

1.6 Estrutura da dissertação.

No capítulo 2 descrevemos como a nossa amostra de aglomerados candidatos à interação foi selecionada, assim como as características dos seus dados no óptico e em raios-X. Também apresentamos uma breve revisão literária sobre eles. No capítulo 3 temos a descrição da nossa análise óptica em detalhes, começando com uma revisão sobre técnicas de *clustering* e o *mclust* e a seguir descrevendo a análise multidimensional de cada sistema. O quarto capítulo trata dos dados em raios-X e seu método de obtenção, redução e análise para os dados do Chandra e do XMM-Newton. O capítulo 5 apresenta uma discussão sobre os principais resultados e perspectivas futuras desse trabalho. Neste trabalho assumimos a cosmologia Λ CDM com $H_0 = 70$ km/s/Mpc, $\Omega_m = 0.3$ e $\Omega_{\Lambda} = 0.7$.

¹Uma colisão flyby ocorre quando dois halos de galáxias se penetram e depois seguem independentes. Isto é diferente do que ocorre numa fusão, onde a interação dos halos resulta em apenas um.

2 Amostra

2.1 Catálogo NoSOCS.

O trabalho aqui apresentado é baseado numa versão suplementar do catálogo Northern Sky Optical Cluster Survey, daqui em diante, NoSOCS (Lopes, 2003; Lopes et al., 2004)[54] [57]. Os aglomerados desse catálogo foram detectados na versão digitalizada do Second Palomar Observatory Sky Survey (POSS-II; DPOSS; Djorgovski et al., 2003) [23] usando técnicas de kernel adaptativo e tesselação de Voronoi. As placas do POSS-II possuem três bandas: azul-verde (IIIa-J+GG395, $\lambda_{eff} \approx 4800$ Å), vermelho (IIIaF+RG610, $\lambda_{eff} \approx$ 6500 Å) e infravermelho muito próximo (IV-N+RG9, $\lambda_{eff} \approx 8500$ Å). Para esta amostra suplementar foram obtidos dados do Sloan Digital Sky Survey DR5 (SDSS; York et al., 2000)[99] de onde foi extraída uma subamostra que apenas inclui galáxias em z < 0.1e compreende 127 aglomerados, todos com desvio para o vermelho espectroscópico do Sloan Digital Sky Survey (SDSS). A esse subconjunto foram adicionados, em Lopes et al. (2009)[58], 56 aglomerados em z < 0.1 do Cluster Infall Region Survey (CIRS; Rines & Diaferio, 2006)[83] que possui sistemas de maior massa, também com espectros do SDSS e selecionados a partir da emissão em raios-X, resultando então numa amostra de 183 aglomerados em z < 0.1.

Como já mencionado, as amostras tiveram dados obtidos do SDSS DR5. No entanto, com o advento do DR7, mais galáxias com espectro obtido pelo SDSS puderam ser adicionadas a essa amostra. Para cada galáxia foram extraídos RA, DEC, magnitudes absolutas nos cinco filtros do Sloan (u,g,r,i,z) e desvio para o vermelho espectroscópico. A seguir foram calculadas as distâncias até o centro do aglomerado e velocidades relativas à velocidade central dos aglomerados. Também foram utilizados dados do DR8 obtidos por ajuste de SED pelo grupo MPA-JHU (Brinchmann et al., 2004) [16]. Entre estes temos a massa estelar, taxa de formação estelar e taxa de formação estelar específica.

Em Lopes et al. (2009) [58], o desvio para o vermelho de cada aglomerado foi determinado de forma mais precisa, usando dados fotométricos de alta-qualidade do SDSS e seguindo Lopes (2007) [55]. Além disso, os membros dos 183 aglomerados foram selecionados. As amostras de aglomerados de galáxias são inevitavelmente contaminadas por membros intrusos que não estão ligados gravitacionalmente ao aglomerado. Isto ocorre por efeito de projeção de galáxias na frente ou no fundo do aglomerado. Tais galáxias são chamadas de *interlopers*. Os *interlopers* da nossa amostra foram removidos usando uma técnica de *shifting gapper* (Fadda et al. 1996; Lopes et al. 2009)[58]. As dispersões de velocidades, R_{500} , R_{200} , M_{500} e M_{200} foram estimadas com análise do Virial similar à realizada em Girardi et al. (1998) [34], Popesso et al. (2005, 2007) [77] [76] e Biviano et al. (2006) [13]. R_{200} e R_{500} são respectivamente os raios onde a densidade de matéria do aglomerado são duzentas e quinhentas vezes a densidade crítica do Universo. E M_{200} e M_{500} são as massas englobadas em R_{200} e R_{500} respectivamente.

2.2 Seleção dos aglomerados cadidatos a interação.

A partir desses 183 sistemas em Universo local, construímos uma amostra de 12 aglomerados candidatos à interação selecionados a partir de inspeção visual do diagrama do espaço de fases e histogramas de velocidade. A figura 2.1 corresponde ao aglomerados A1035 e exemplifica o método de seleção da amostra de candidatos à interação. No painel acima, temos o histograma da distribuição de velocidades que aparentemente apresenta uma distribuição bimodal. O modo com a velocidade relativa ao centro do aglomerado mais baixa foi sublinhado com a cor vermelha e parece estar centrado por volta de $-3000 \ km/s$. O modo que apresenta velocidade relativa ao centro do aglomerado mais alta foi sublinhado com a cor azul e parece estar centrado próximo de 0 km/s. No painel abaixo, o diagrama de espaço de fases mostra então os mesmos modos indicados com as mesmas cores. Ambos se estendem num mesmo raio até quase 2 Mpc, o que indica que são dois aglomerados projetados na linha de visada. O mesmo método foi utilizado para selecionar os outros aglomerados da nossa amostra. Alguns destes candidatos a aglomerados em interação já eram evidentes naquela época, por inspeção de diagrama de fases e histograma de velocidade, como A1035 e A1291.

Figura 2.1: Método de seleção de aglomerados candidatos à interação a partir de análise do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases.



Velocity Distribution A1035



Phase Space Diagram

Após rodar o mclust, decidimos por descartar os aglomerados NSCS J155626+273610 e NSCS J155630+271753 por apresentarem muitas subestruturas, cada um apresentou nove componentes em alguma das análises. Mantivemos em nossa amostra apenas aglomerados que apresentaram no máximo 6 componentes em alguma das análises. Isso foi feito com o intuito de deixar a amostra o mais simples possível, já que esse é um estudo inicial. Descrevemos melhor esse processo no capítulo 3. Também optamos por descartar NSCS J103129+401431, por já aparecer no campo de A1035B, além de A1291B, por já aparecer no campo de A1291A. Na verdade, os aglomerados descartados nestes dois últimos casos são o segundo sistema candidato à interação. Pretendemos analisar alguns dos aglomerados descartados em trabalhos futuros. **Nossa amostra final é então de** oito aglomerados, apresentados na tabela 2.1, as linhas em vermelho indicam os aglomerados que foram excluídos de nossa amostra final. Na primeira coluna temos o nome do aglomerado como apresentado em Lopes et al. (2009) [58]. Na segunda e na terceira listamos as coordenadas dos aglomerados em graus. Na quarta coluna temos o desvio para o vermelho espectroscópico. As quatro últimas colunas indicam se o aglomerado tem dados disponíveis no XMM-Newton, Chandra, Suzaku ou ROSAT.

ID LOPES et al. 2009	RA (deg)	DEC (deg)	z_{spec}	XMM	Chandra	SUZAKU	ROSAT
A1035B	158.0590	40.2470	0.0776	\checkmark			\checkmark
A1291B	173.0817	55.9789	0.0547	\checkmark			\checkmark
A1291A	173.0817	55.9789	0.0548	\checkmark			\checkmark
NSCS J103129+401431	157.8658	40.2237	0.0683	\checkmark			\checkmark
NSCS J133106-014460	202.7879	-1.7386	0.0842	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
A1377	176.8363	55.7433	0.0511		\checkmark		\checkmark
A2067	230.7830	30.8450	0.0729				
NSCS J121723+040720	184.3665	4.1559	0.0792				\checkmark
NSCS J155626+273610	239.1102	27.5881	0.0884				\checkmark
NSCS J155630+271753	239.1595	27.2939	0.0881				\checkmark
A2399	329.3575	-7.7947	0.0583	\checkmark		\checkmark	\checkmark
A2428	334.0646	-9.3400	0.0838				\checkmark

Tabela 2.1: Amostra com os 12 aglomerados e seus dados disponíveis em raios-X.

2.3 Dados no óptico (SDSS)

O Sloan Digital Sky Survey mapeia o Universo usando diferentes filtros, u, g, r, i, z, no modo drift scan. Essa forma de observação usa o movimento dos objetos celestes no plano focal do telescópio Sloan no Apache Point Observatory (APO), USA, enquanto sua direção é desligada, para imagear longas faixas contínuas do céu sem ter que mover o telescópio. Isso torna esse método apropriado para levantamentos como o SDSS. Para realizar observações nesse modo, as linhas da CCD tem que ser lidas em sincronia perfeita com o movimento do céu no plano focal. O SDSS já fornece os dados com a correção para extinção. Os catálogos de galáxias do SDSS foram obtidos na plataforma "CasJobs"², uma base on-line para grandes catálogos científicos. O "CasJobs" foi projetado para espelhar e aprimorar o acesso local à consulta livre em um ambiente web. A consulta é feita através de linguagem de consulta estruturada (SQL).

Na figura 2.2 temos as distribuições de velocidades e os diagramas de espaço de fases para cada um dos oito aglomerados de nossa amostra final. Nos painéis inferiores onde estão os diagramas de espaço de fases, as velocidades são relativas à velocidade central do aglomerado. Os histogramas e os diagramas de espaço de fases mostram apenas a região de interesse em nosso estudo e foram cortados nos mesmos valores utilizados em nossa análise. Nossa amostra de aglomerados candidatos à interação foi selecionada a partir da inspeção visual desses gráficos.

²http://skyserver.sdss.org/casjobs/















Phase Space Diagram





Phase Space Diagram



Velocity Distribution A1377

Phase Space Diagram







Velocity Distribution NSCS J121723+040720









Phase Space Diagram





Phase Space Diagram



2.4 Dados em raios-X

Nesse trabalho, demos preferência a aglomerados com dados do XMM-Newton por causa do largo campo de visão (30' de diâmetro) de suas 3 câmeras, EMOS1, EMOS2 and EPN. Nossos aglomerados por estarem no Universo local tem um tamanho angular grande, A1750 por exemplo ocupa todo o campo de visão das câmeras do XMM-Newton. As câmeras cobrem uma faixa de energia de 0.15 a 15 keV e o telescópio tem resolução angular de 15". Mesmo assim, ainda mantivemos na amostra três aglomerados que não tinham observações no XMM, mas tinham noutros satélites: A1377 que tem observação do Chandra, A2067 que possui observação no Suzaku e NSCS J121723-040720 que tem observação no ROSAT. Este último possui um grupo que aparece na sua imagem mais ao sul e foi identificado como ZwCl 1215. Por sua vez, ZwCl 1215 possui observação XMM-Newton e também no Chandra. O Chandra é o telescópio de raios-X que tem a melhor resolução angular, 0.5". No entanto, até mesmo ACIS-I, que é o seu melhor detector para fontes com grande tamanho angular, tem campo de visão de apenas 16' x 16'. A faixa de energia alcançada pelos detectores ACIS é de 0.2 a 10.0 keV. A fim de obter dados de qualidade satisfatória, apenas observações com tempo de exposição maior que 10000 segundos foram utilizados para análise do XMM-Newton. Vale frisar que A1035B e NSCS J103129+401431 aparecem no mesmo campo na imagem do XMM. O mesmo acontece com A1291A e A1291B. A tabela 2.2 apresenta algumas informações sobre as observações da amostra do XMM-Newton. A primeira, segunda, terceira e quarta colunas mostram o número de identificação da observação, o nome do aglomerado, o tempo de exposição e a data da observação respectivamente. A quinta e a sexta mostram os modos de observação e os filtros utilizados para as câmeras EMOS e EPN respectivamente. A sétima apresenta o nome do investigador principal e a oitava lista o número de artigos relacionados àquela observação do XMM-Newton. Na figura 2.3 temos as cinco imagens obtidas pelo XMM-Newton. As imagens foram reduzidas seguindo o manual de Snowden & Kuntz (2011) [91].

Tabela 2.2: Informações sobre as observações da amostra disponíveis na plataforma do XMM-Newton.

OBS_ID	ALVO	EXPOSIÇÂO (segundos)	DATA	MODO/FILTRO (EMOS)	MODO/FILTRO (EPN)	PI	XMM PAPERS
0653810501	A1035	17915	23/04/2011	FullFrame/Medium	FullFrame/Thin1	Sun, Ming	6
0651780501	A1291	18285	23/04/2011	FullFrame/Medium	FullFrame/Medium	Mulchaey, John	3
0112240301	A1750	34608	29/07/2001	FullFrame/Medium	ExtendedFullFrame/Medium	Turner, Martin	47
0654440101	A2399	97166	07/06/2010	FullFrame/Thin1	ExtendedFullFrame/Thin1	Pratt, Gabriel	8
0675472401	A2428	11917	20/11/2011	FullFrame/Thin1	FullFrame/Thin1	Boehringer, Hans	2

2.5 Dados complementares em raios-X

Todos os aglomerados da nossa amostra inicial de 12 aglomerados tem dados públicos na plataforma do ROSAT. NSCS J133106-014460 (A1750), ZwCl 1215 (que aparece ao sul de NSCS J121723+040720) e A1377 também tem dados no Chandra, no entanto este último possui dados apenas de uma pequena parte da região central, pois foi capturado pelas CCD's ACIS-S, que tem campo de visão pequeno ($0.5 \ge 0.5$ Mpc em z=0.0511). A1750, A2067 e A2399 tem dados disponíveis do Suzaku. Incluímos análises da literatura de A2067 neste trabalho. Futuramente, pretendemos fazer nossa própria análise dos dados disponíveis do Suzaku. A tabela 2.1 apresenta os aglomerados da nossa amostra final e indica dados disponíveis no XMM e outros satélites em raios-X. A tabela 2.3 com-

Figura 2.3: Imagens dos 5 aglomerados da nossa amostra com dados públicos no arquivo do XMM-Newton. As imagens das câmeras EMOS1, EMOS2 e EPN foram combinadas com o comando merge do ESAS. Os contornos destacam as concentrações das emissões em raios-X do meio intraglomerado.



para as principais características dos satélites mais importantes em raios-X. ³ A primeira coluna contém o nome dos satélites. A seguir na segunda coluna são apresentadas as resoluções angulares, em segundos de arcos, na largura à meia energia (HEW) da função de espalhamento pontual (PSF). A terceira coluna contém as faixas de energia, em quilo elétrons-volt (keV), alcançadas por cada satélite. A quarta coluna apresenta a área efetiva do espelho medida a 1 keV. A quinta coluna mostra a visibilidade orbital do alvo em horas. A visibilidade do alvo depende de fatores como as zonas de exclusão solar, lunar e terrestre. A zona de exclusão terrestre diminui a órbitas mais altas como a do XMM-Newton e do Chandra. A última coluna apresenta a resolução espectral a 1 keV. A figura 2.4 mostra os mapas de exposição de ZwCl 1215 no painel a esquerda e de A1377 obtidos para as imagens públicas do Chandra. ZwCl 1215 também possui imagem no XMM-Newton, que também será analisada futuramente.

Satallita	Mirror PSF	E range	A at 1 keV	Orbital target	Energy resolution	
Satemite	$\operatorname{HEW}["]$	$[\mathrm{keV}]$	$[cm^2]$	visibility [hr]	at $1 \text{ keV}[eV]$	
XMM-Newton	15	0.15 - 12	4650	36,7	4 (RGS)	
Chandra	0,5	0.1 - 10	555 (ACIS-S)	44,4	1 (HETG)	
ROSAT	7	0.1 - 2.4	400	1,3	500	
ASCA	174	0.5 - 10	350	0,9	100	
Suzaku	108 - 138	0.2 - 600	1760 (XIS)	0,72	50	
Swift	18	0.2-10 (XRT)	133,5	0,8	70	
NuSTAR	58	3-79	n.a.	0,8	n.a.	

Tabela 2.3: Comparações entre os satélites mais importantes em raios-X

 $^{{}^{3}} https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/xmmcomp.html \# 3875$



Figura 2.4: Mapas de exposição de ZwCl 1215, à esquerda, e Abell 1377, à direita, obtidos a partir de imagens do Chandra.

2.6 Revisão literária

A fim de compararmos nossos resultados com trabalhos anteriores realizamos uma pesquisa literária na plataforma do NASA ADS. As principais informações de cada aglomerado são listadas a seguir.

Abell 1035B De acordo com Rines & Diaferio (2006) [83] A1035 consiste de dois sistemas separados por 3000 km/s em desvio para o vermelho e quase concêntricos no plano do céu. Eles calcularam os desvios para o vermelho das duas estruturas através de análise hierárquica, obtendo z = 0.06748 e z = 0.08008, para A1035A e A1035B respectivamente. A partir de observações do satélite ROSAT e comparações com os dados do SDSS, eles concluíram que ambos são aglomerados com emissão em raios-X, sendo o pico mais ao norte associado ao desvio para o vermelho mais distante e o mais ao sul, mais próximo. A1035B é o aglomerado de maior massa. A mesma classificação bimodal foi atribuída por Kopylov & Kopylova (2009) [46] à A1035. Eles concluíram que A1035 consiste em dois aglomerados gravitacionalmente independentes com dispersão de velocidades de 566 km/s e 610 km/s e massas no R₂₀₀ iguais a 2.7 x 10¹⁴ M_☉ e 3.5 x 10¹⁴ M_☉, respectivamente.

Abell 1291A Rines & Diaferio (2006) [83] classificaram A1291 como um possível aglomerado em fusão. Com duas componentes quase concêntricas separadas em 2000 km/s. Eles também encontraram que o diagrama de cáustica mostra duas regiões de "infall" que se sobrepõe na parte central e também que A1318 está num raio de 4 Mpc e no mesmo desvio para o vermelho de A1291. O pico da imagem em raios-X está centrado numa galáxia de magnitude $M_r \approx -21.3$ em A1291A que está associada ao componente de desvio para o vermelho mais próximo. Não foi encontrada emissão em raios-X associada à componente de maior desvio para o vermelho.

Abell 1750 As duas componentes que são observadas em raios-X de A1750 tem separação de $340h^{-1}$ Kpc em projeção e 1300 km/s em velocidade radial (Belsole et al., 2004) [10]. O centro do óptico aparece associado à fonte primária de raios-X em posição e desvio para o vermelho. A partir de análise de imagens do Einstein, A1750 foi classificado como um aglomerado duplo em fusão (Forman et al., 1981) [33]. Observações do ASCA e ROSAT mostram uma possível onda de choque de gás aquecido com uma temperatura elevada de 5.5 keV entre esses subgrupos, que é então um indicativo de que eles são premergers (Donnelly et al., 2001) [24]. Essa região de temperatura elevada foi confirmada pelo XMM-Newton. De acordo com De Grandi & Molendi (2002) [22] e com Neumann (2005) [70], A1750 é um sistema em fusão tripla, num desvio para o vermelho de 0.085 e com três picos em raios-X.

Abell 1377 A estrutura em raios-X desse aglomerado é muito irregular. Uma imagem ampliada do centro mostra muitos picos de emissão. A brightest cluster galaxy (BCG) aparece deslocada do segundo pico mais brilhante de emissão em raios-X cerca de 10" na direção sul, o que representa 10 Kpc. O pico mais brilhante em raios-X não tem contrapartida óptica. A temperatura do (ICM) é 1.7 keV e a abundância é 0.09 Z_{\odot} , que representa um valor baixo comparado com valores típicos de aglomerados (~ 0.3 - 0.5). O que indica que o gás do aglomerado ainda não teve tempo suficiente de ser enriquecido e também ainda não teve tempo de atingir o estado relaxado. (Lakhchaura & Singh, 2014) [49]. Abell 2067 Abell 2067 pertence ao superaglomerado Corona Borealis e se localiza a 2.7 Mpc nordeste de A2061. Eles tem uma velocidade relativa de 600km/s na linha de visada, estando ambos provavelmente ligados gravitacionalmente. A2061 é 4 vezes mais luminoso em raios-X que A2067 (Rines & Diaferio, 2006) [83]. Van Weeren et al. (2011) [97] notaram que a elongação observada em A2061 na direção nordeste sudoeste está provavelmente ligada à subestruturas no óptico e não à interação com A2067. Einasto et al. (2012) [28] analisaram o sistema A2061/A2067 com um modelo de mistura de gaussianas e acharam que o melhor ajuste era para uma mistura de 3 componentes.

NSCS J121723+040720 Não foram encontrados dados na literatura para este aglomerado além dos artigos do NoSOCS.

Abell 2399 Bohringer et al. (2010) [15] classificaram Abell 2399 como bimodal em raios-X. Abell 2399 também foi estudado no óptico por Ramella et al. (2007) [80], mas eles não detectaram nenhuma subestrutura. Mas para Forgarty et al. (2014) [31], A2399 é provavelmente o resultado da fusão de dois aglomerados e também é o aglomerado mais complicado estudado da amostra deles. O pico de densidade coincide com o pico de raios-X e com a localização da BCG.

Abell 2428 Não foram encontrados dados relevantes para este projeto na literatura deste aglomerado.

3 Análise no óptico com o MCLUST

3.1 Técnicas de *clustering*

Na era das grandes quantidades de dados, técnicas de aprendizagem não supervisionadas são um valioso recurso para entender a estrutura dos nossos dados, mesmo que não tenhamos nenhum conhecimento prévio sobre o comportamento deles. Elas são essenciais para identificar números, tamanhos, propriedades em comum e também *outliers* dos aglomerados. Um dos tipos de aprendizagem não supervisionada mais populares na atualidade é a análise de componente principal, um recurso para visualização dos dados ou para pré-processamento de dados antes de aplicar alguma técnica de aprendizagem supervisionada. Outro exemplo em destaque na atualidade são as técnicas de *clustering*, que consistem numa ampla gama de métodos para procurar por características desconhecidas dos nossos dados.

Existem diferentes tipos de técnicas de *clustering*; *clustering* hierárquico aglomerativo e divisivo, *k-means*, modelos de mistura de gaussianas, etc. Neste capítulo vamos focar numa técnica de *clustering* que recentemente vem ganhando aplicação na astronomia, o modelo de misturas de gaussianas.

Códigos de *clustering* hierárquicos aglomerativos começam com cada objeto individual classificado como um aglomerado separado, encontram a distância mínima entre cada grupo e aglomeram os grupos que são mais similares. O código então repete o processo até que todos os subgrupos estejam fundidos num único aglomerado. O processo inverso ocorre com o *clustering* hierárquico divisivo, onde originalmente os dados são considerados como um só grupo e depois vão sendo divididos em subgrupos. Uma forma de representar um aglomerado é indicando o seu centroide, que é uma média das distâncias de todos os pontos dos aglomerados no espaço. Para descobrir o aglomerado ao qual cada ponto está mais próximo, calculamos suas distâncias aos centroides dos aglomerados. A medida em que os aglomerados vão sendo agrupados pelo código, uma árvore de fusão, *merger* tree, vai sendo formada. Esta figura é conhecida como dendograma. Ambas as formas de *clustering* hierárquicos usam o dendograma como representação dos passos do algoritmo. Na figura 3.2 podemos ver um exemplo de dendograma para os clusters representados na figura 3.1. Uma pergunta natural, que surge sobre esse tipo de identificação de grupos, é como saber quando parar de aglomerar os dados, no caso aglomerativo, ou dividir, no caso divisivo. Uma forma de resolver esse problema é fornecer um número fixo de aglomerados antes de dar início ao processo. Isso é fácil de se fazer quando se tem dados com grupos bem distintos previamente identificados, por exemplo, estrelas e galáxias. Neste caso, faríamos o código parar quando chegasse em dois grupos. A outra forma de se resolver o problema é parar de formar aglomerados quando a formação deles não é coesa o suficiente. Aglomerados mal formados apresentam baixa coesão. A coesão pode ser definida pelo raio ou pelo diâmetro de um aglomerado. O diâmetro de um aglomerado, por sua vez, é definido pela distância máxima entre dois pontos do mesmo. Podemos parar de formar aglomerados quando o diâmetro atinge um limite máximo. Outra opção é definir o conceito de raio do aglomerado como a distância máxima entre um membro e o centroide do aglomerado e assim, similarmente ao exemplo do diâmetro, podemos parar a formação de novos aglomerados quando essa distância atinge um limite máximo. A terceira forma de decidir quando devemos parar a formação de aglomerados tem a ver com a densidade. A densidade é dada pelo número de membros dividido por unidade de volume. Podemos então decidir parar a formação de novos aglomerados quando a densidade atingir um valor limite.



Figura 3.1: Quarenta e cinco observações geradas num espaço bidimensional. As cores representam três classes distintas encontradas através de aglomeração hierárquica. Fonte: James et al. (2017) [43]



Figura 3.2: Painel da esquerda: Exemplo de dendograma gerado pela análise hierárquica das observações mostradas na figura 3.1. Painel do centro: O mesmo dendograma do painel esquerdo com um corte na altura nove, resultando em duas aglomerações distintas. Painel da direita: O mesmo dendograma do painel esquerdo dessa vez com um corte na altura 5, resultando então nos 3 grupos distintos que também são representados na figura 3.1. Fonte: James et al. (2017) [43]
Modelos de mistura de gaussianas (GMM) ajustam os dados através de distribuições gaussianas, tendo como parâmetros a média e covariância dos dados descrevendo sua forma elíptica, sendo então mais elaborados que o método k-means que só usa a média para o ajuste. O método k-means funciona, basicamente, atribuindo-se uma quantidade arbitrária "k" de pontos aleatórios que servem como ponto de partida para o algoritmo. Tais pontos são chamados de seeds. O código calcula então a distância de todos os pontos a cada seed e atribui os pontos aos grupos dos seeds mais próximos. Após realizada essa primeira classificação, o centroide de cada grupo formado é calculado e os membros dos grupos são redefinidos, cada ponto é atribuído ao grupo do centroide mais próximo. Esse processo se repete até que as posições dos centroides parem de variar. Uma das principais fraquezas do método k-means é o fato dele usar como base distâncias euclidianas. Isso faz com que ele tenha problemas em identificar aglomerados com formas assimétricas ou grupos diferentes de dados que se sobrepõem.

O algoritmo de maximização da expectativa usado no GMM é muito semelhante ao k-means, a diferença é que ele atribui a cada ponto uma probabilidade suave de pertencer a um aglomerado. Isso significa que modelos de mistura de gaussianas fornecem a probabilidade de cada ponto pertencer a um determinado aglomerado. Isto nos permite criar novas amostras que supomos ser parecidas com os dados analisados, ou comparar duas amostras de dados como o conjunto de treino e o de teste para buscar diferenças entre eles. E por fim, também nos possibilita inserir valores que estão faltando nos nossos dados através de técnicas de *imputation*. As distribuições gaussianas são descritas basicamente pelas suas médias, variâncias e alturas. O GMM usa Maximização da Expectativa (EM). O algoritmo de EM é um dos mais usados para estimar os parâmetros (desvio padrão e média) de uma mistura. Basicamente ele maximiza a verossimilhança da estimativa de densidade calculando a cada iteração a expectativa da função log-verossimilhança usando a estimativa atual dos parâmetros (etapa da Expectativa) e atualizando os parâmetros para maximizar a função log-verossimilhança (etapa da Maximização). O primeiro passo desse algoritmo considera fixos os parâmetros que descrevem a gaussiana e calcula para cada ponto a probabilidade dele pertencer a cada aglomerado. No segundo passo, maximização, a probabilidade de cada ponto pertencer a um determinado aglomerado é considerada fixa. Os parâmetros da gaussiana são ponderados pelo somatório das probabilidades de cada ponto pertencer aos aglomerados. Os dois passos do EM aumentam a verossimilhanca em escala logarítmica do modelo que é o logaritmo do somatório da probabilidade de cada ponto pertencer a uma determinada gaussiana da mixtura. As iterações continuam até convergirem. A figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 ilustram o processo do ajuste pelo modelo de mistura de gaussianas, os eixos são puramente ilustrativos. Na figura 3.3 os dados foram separados em dois grupos representados nas cores amarela e vermelha. Inicialmente, a "cruz" vermelha e o "x" amarelo foram lançados em posições aleatórias. Esses dois pontos são conhecidos como *seeds*. Cada ponto do nosso conjunto de dados foi então atribuído ao *seed* que se localiza mais próximo dele. Os dois grupos formados são então representados nas cores amarela e vermelha. A seguir, na figura 3.4, o código calculou o centroide de cada um dos grupos encontrados e então os membros são atribuídos aos seeds mais próximos novamente, e então as gaussianas bidimensionais são ajustadas à distribuição dos dados. Os centroides de cada grupo são recalculados e a atribuição de membros é refeita na figura 3.5. O processo então continua a se repetir até que não haja mais variação do centroide, ou seja, quando o modelo converge. A figura 3.6 mostra então o resultado da classificação após a última iteração realizada.



Figura 3.3: Primeiro passo do algoritmo GMM.



Figura 3.4: Segundo passo do algoritmo GMM.



Figura 3.5: Terceiro passo do algoritmo GMM.



Figura 3.6: Quarto passo do algoritmo GMM.

Enquanto o GMM enfrenta o problema de escolher o número de componentes da mistura, um outro método chamado de *kernel density estimator* (KDE) resolve esse empasse usando uma componente centralizada em cada um dos pontos do conjunto de dados. Essa componente centralizada pode ser o kernel gaussiano, por exemplo. Todas as componentes tem o mesmo peso e o desvio padrão é escolhido para uma constante chamada de largura de banda. Esta é algo similar aos *bins* de um histograma e pode ser definida automaticamente ou por inspeção visual. Na figura 3.7 temos a comparação da análise realizada para o histograma de velocidades de A1035 por GMM e pelo método KDE. Ambos encontraram o mesmo número de componentes, porém o modelo de mistura de gaussianas (linha sólida em preto) se ajustou melhor a maior parte da distribuição. O KDE (linha tracejada em vermelho) falhou nas partes com maior número de membros e no vale entre os dois modos encontrados.



Figura 3.7: Histograma de velocidades de A1035 com comparação entre análises do método KDE e do GMM.

3.2 *MCLUST*: Um modelo de mistura de gaussianas

O pacote do R mclust (Scrucca et al., 2016) [88] é um GMM que calcula o log verossimilhança para cada iteração e então computa a aproximação mais efetiva para estimar nossas misturas, através da variação da forma, orientação e volume de gaussianas multidimensionais. O mclust usa o Bayesian Information Critereon (BIC) para decidir sobre a qualidade dos ajustes. O BIC é um critério para selecionar entre um número finito num conjunto de modelos. A tabela 3.1 mostra os modelos ajustados pelo mclust e suas características. No ajuste de modelos a verossimilhança pode ser aumentada adicionando-se parâmetros, mas isso faz com que ocorra overfitting e mais grupos do que os que realmente existem sejam encontrados. O BIC resolve este problema introduzindo um termo de penalidade para o número de parâmetros no modelo.

Tabela 3.1: Modelos ajustados pelo *mclust*. O "x" na terceira e quarta colunas representa a disponibilidade do modelo em *Cluster* Hierárquico (HC) e Maximização da Expectativa (EM).

Modelos ajustados pelo <i>Mclust</i>								
Id	Modelo	HC	EM	Distribuição	Volume	Forma	Orientação	
Е		Х	Х	(univariável)	Igual			
V		Х	Х	(univariável)	Variável			
EII	λ I	X	Х	Esférico	Igual	Igual	NA	
VII	λ_k I	Х	Х	Esférico	Variável	Igual	NA	
EEI	λ A		Х	Diagonal	Igual	Igual	$E.C.^*$	
VEI	$\lambda_k A$		Х	Diagonal	Variável	Igual	$E.C.^*$	
EVI	λA_k		X	Diagonal	Igual	Variável	$E.C.^*$	
VVI	$\lambda_k A_k$		Х	Diagonal	Variável	Variável	$E.C.^*$	
EEE	λDAD^T	Х	Х	Elipsoidal	Igual	Igual	Igual	
EEV	$\lambda D_k A D_k^T$		Х	Elipsoidal	Igual	Igual	Variável	
VEV	$\lambda_k D_k A D_k^T$		X	Elipsoidal	Variável	Igual	Variável	
VVV	$\lambda_k D_k A_k D_k^T$	х	Х	Elipsoidal	Variável	Variável	Variável	

O GMM tenta ajustar gaussianas com diferentes formas e tamanhos, para reconstruir a distribuição dos dados e atribuir classificação aos membros da amostra aos modos encontrados. Na figura 3.8, temos um histograma para as velocidades do aglomerado A1035B, após a análise do *mclust* duas gaussianas foram ajustadas, portanto, dois modos encontrados.

O mclust nos permite escolher o número de modos que queremos encontrar, assim como no k-means, mas também nos permite encontrar os modos sem fixar a quantidade de modos a ser encontrada.

Podemos obter com o *mclust* o gráfico do BIC, que basicamente mostra qual modelo foi escolhido pelo *mclust*. O modelo escolhido pelo *mclust* é aquele que tem o maior BIC. No caso de uma análise unidimensional, temos apenas dois modelos a serem ajustados, o de variância igual, E e o de variância variável, V. Na figura 3.9, temos os modelos V e E com BIC muito próximos, concordando que existem apenas dois modos de velocidade para Abell 1035B.

3.3 Análise de cada aglomerado em 1D, 2D e 3D

Para os dados no óptico, realizamos uma análise com o *mclust* em 1D apenas na velocidade, 2D em RA e DEC e por fim em 3D, utilizando RA, DEC e velocidade. Os modos identificados pelo *mclust* em 3D foram então isolados e tiveram seus centroides calculados para RA, DEC e z_{spec} . Existe um viés na análise em 3D causado por misturarmos unidades diferentes com magnitudes ainda mais diferentes (a posição varia em poucos graus, enquanto que a velocidade varia em dezenas de milhares de quilômetros por segundo). O *mclust* sozinho não resolve esse problema, para isso aplicamos a função do *R scale*, para reescalonar as unidades.



Figura 3.8: Histograma de velocidades de A1035B



Figura 3.9: BIC dos dois modelos ajustados pelo mclust na análise unidimensional de A1035B.

3.3.1 Abell 1035B

Análise em 1D Para A1035B, após a inspeção do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases, decidimos rodar o *mclust* entre -5000 km/s e 3000 km/s com um corte radial de 2 Mpc. O *mclust* encontrou então dois modos, com picos em cz= 20394.05 km/s e cz= 23521.34 km/s. Na tabela 3.2 temos os parâmetros obtidos na análise em 1D.

Modelo V (univariável, variância desigual)					
Log Verossimilhança -854.20					
Número de objetos	99				
BIC	-1731.38				
Modos	1	2			
Número de membros	54	45			
Médias de cz (km/s)	20394.05	23521.34			

Tabela 3.2: Par<u>âmetros obtidos pelo melust na análise unidimensional de A1035B</u>

Na figura 3.10 vemos o gráfico de classificação dos membros após a análise 1D. Os traços pretos representam cada galáxia da amostra; em traços vermelhos temos as galáxias que foram atribuídas ao primeiro modo e em traços azuis as que foram atribuídas ao segundo modo. Os valores menores que 21500 km/s foram atribuídos ao modo 1 (azul) e os maiores ao modo 2 (vermelho).

Na figura 3.11 temos um gráfico de incertezas para a mesma análise unidimensional. A incerteza é dada por 1 menos a maior probabilidade posterior. Ou seja, na figura 3.10, um membro com velocidade de 20000 km/s tem praticamente 100 % de chance de pertencer ao grupo de galáxias apresentado em traços azuis, pois sua incerteza é próxima de zero. Os membros que estão entre um grupo e outro tem suas incertezas maiores, pois nessa região é mais difícil para o código separar quem pertence a cada modo.

A figura 3.12 mostra o gráfico de densidades com as duas gaussianas ajustadas pelo *mclust* à distribuição de velocidades. O vale entre as duas gaussianas corresponde a região onde são encontradas as maiores incertezas.

O mclust também nos permite criar gráficos de diagnóstico para o nosso ajuste. O quantil-quantil ou Q-Q plot, na figura 3.13, mostra de forma subjetiva quão gaussiana é nossa amostra. Quanto mais nossos dados se aproximam da reta, melhor a qualidade do ajuste. Através desse gráfico também é possível identificar os pontos para os quais o ajuste não é tão bom, os *outliers*.

Análise em 2D A análise do *mclust* em 2D, ascensão reta e declinação, só identificou um modo. Na figura 3.14, temos o gráfico da classificação, onde o círculo preto mostra a forma e a orientação da elipse de covariância da gaussiana bidimensional ajustada a essa distribuição. Na figura 3.15, temos o gráfico que indica o BIC dos 14 modelos ajustados pelo *mclust*. Por fim, na figura 3.16, temos o gráfico da densidade para este único modo. A tabela 3.3 mostra os parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise bidimensional.

Análise em 3D Para analisar o aglomerado em 3D consideramos a velocidade na linha de visada como terceira dimensão. Embora a velocidade não esteja na mesma dimensão da ascensão reta e declinação, essa é a melhor opção que temos para analisar a terceira coordenada, já que a velocidade, de certa forma, carrega informação sobre a posição. De toda forma, este método nos permite afirmar que as galáxias analisadas estão dentro do



Figura 3.10: Classificação de membros de A1035B obtida após análise unidimensional do mclust



Figura 3.11: Incertezas para os membros de A1035B obtida após análise unidimensional do mclust.



Figura 3.12: Densidade dos membros de A1035B obtida após análise unidimensional do $\mathit{mclust}.$



Figura 3.13: Gráfico quantil-quantil dos membros de A1035B obtido após análise unidimensional do $\mathit{mclust.}$

Modelo AAI (normal, diagonar	munivariauaj
Log Verossimilhança	117.56
Número de objetos	99
BIC	216.74
Modos	1
Número de membros de cada modo	99
Média da RA (graus)	158.02
Média da DEC (graus)	40.22

Tabela 3.3: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise bidimensional de A1035B Modelo XXI (normal, diagonal multivariada)



Figura 3.14: Classificação de membros de A1035B obtida após análise bidimensional do mclust.

volume do aglomerado assim como em Einasto et al. (2010) [27]. Como já mencionado, os dados foram normalizados e "recentrados" com função *scale* do R. As figuras 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20 mostram respectivamente o BIC, classificação de membros, incertezas e densidades para a análise 3D. A tabela 3.4 mostra os parâmetros obtidos na análise tridimensional do *mclust*.

3.3.2 Abell 1291A

Análise 1D No caso de A1291A, após a inspeção do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases, optamos por rodar o *mclust* entre ± 2000 km/s com um corte radial de 1 Mpc. O *mclust* encontrou então dois modos, com picos em cz ≈ 15460.93 km/s e cz ≈ 17256.09 km/s. Na tabela 3.5 temos os parâmetros obtidos na análise em 1D. Na figura 3.21, os painéis da esquerda e direita representam respectivamente a classificação dos membros e as densidades obtidas pelo *mclust* na análise unidimensional.



Figura 3.15: Diagnóstico do BIC obtido após análise bidimensional de A1035B pelo mclust.

Modelo VEI (diagonal, formas iguais)					
Log verossimilhança	23.51				
Número de objetos		99			
BIC	-3	3.53			
Modos	1	2			
Número de membros	44	55			
Média da RA (em escala)	0.06	0.02			
Média da DEC (em escala)	0.15	-0.25			
Média de cz (em escala)	-0.51	-0.74			

Tabela 3.4: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise tridimensional de A1035B

Análise 2D A análise bidimensional de A1291A dentro de um raio de 1 Mpc mostra apenas um modo. A tabela 3.6 apresenta os parâmetros obtidos pelo *mclust*. A figura 3.22 apresenta a classificação e a densidade da amostra na análise 2D.

Análise 3D A análise tridimensional de A1291A dentro de um raio de 1 Mpc o *mclust* encontrou novamente dois modos de velocidade. Os centroides desses dois grupos aparecem bastantes próximos, mas as elipses de covariância tem formas e orientações diferentes. A tabela 3.7 apresenta os parâmetros obtidos pelo *mclust* para esta análise. Na figura 3.23 podemos ver os gráficos da classificação e densidade obtidos pela análise 3D do *mclust*.

log Density Perspective Plot



Figura 3.16: Gráfico em perspectiva do logaritmo da densidade obtido após análise bidimensional de A1035 pelo *mclust*.

Modelo E (univariável, variância igual)					
Log Verossimilhança	5.57				
Número de objetos	58				
BIC	-969	59.38			
Modos	1	2			
Número de membros	31	27			
Médias de cz (km/s)	15460.93	17256.09			

Tabela 3.5: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise unidimensional de A1291A.

3.3.3 Abell 1750

Análise 1D Para NSCS J133106-014460, também conhecido como Abell 1750, após a inspeção do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases, optamos por rodar o *mclust* entre ± 2000 km/s. Nós aplicamos um corte nos dados projetados limitando-os a mesma área da emissão em raios-X da imagem do XMM-Newton. Analisando o diagrama de espaço de fases identificamos bimodalidade neste grupo. O *mclust* também encontrou dois modos com picos em cz ≈ 24953 km/s e cz ≈ 26229 km/s. Na tabela 3.8, temos os parâmetros obtidos na análise em 1D.

A análise do *mclust* para esse caso também foi realizada em corte radial de 4 Mpc encontrando novamente 2 modos bem distintos de velocidade. Pelo fato da emissão em raios-X apresentar claramente duas "concentrações" bem separadas, investigamos se cada modo estaria associado a cada uma das "concentrações". De fato, o pico de raios-X da concentração norte está próximo a uma galáxia em z = 0.0836 e o pico em raios-X da concentração sul está próximo a uma galáxia em z = 0.0879. Para os dois grupos de velocidade obtidos pelo *mclust* os centroides dos desvios para o vermelho estão em z \approx



Figura 3.17: BIC dos modelos ajustados pelo mclust na análise tridimensional de A1035.

Modelo XXI (normal	, diagonal multivariada)
Log Verossimilhança	57.46
Número de objetos	58
BIC	99.69
Modos	1
Número de membros	58
Média da RA (graus)	173.06
Média da DEC (graus)	55.98

Tabela 3.6: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise bidimensional de A1291A.

0.0832 e z \approx 0.0876.

Vale salientar que no campo desse aglomerado tem uma região considerável onde não temos dados. Parte disso ocorre porque este aglomerado se localiza próximo à borda da região que o SDSS cobriu, podendo assim haver um viés no número de desvios para o vermelho espectroscópicos naquela região. Na figura 3.24 temos os gráficos da classificação e da densidade obtidos pela análise 1D do *mclust*.

Análise 2D Usando os mesmos limites de velocidade e raio impostos na análise unidimensional, o *mclust* encontrou 4 grupos do plano do céu na análise 2D. Na figura 3.25, observamos que os dois grupos mais numerosos, grupos 1 e 3, intersectam as duas concentrações da imagem em raios-X. Os círculos verdes estão centrados nos centroides dos grupos identificadas pelo *mclust*, mas os tamanhos deles não representam as dimensões reais dos grupos. A tabela 3.9 apresenta os resultados da análise 2D do *mclust*. A figura 3.26 mostra respectivamente os gráficos da classificação e densidade obtidos pela análise 2D do *mclust*.



Figura 3.18: Classificação de membros de A1035B obtida após análise tridimensional pelo mclust.

Análise 3D No caso da análise tridimensional, os modos mais numerosos 1 e 3 coincidem com a concentração do gás de forma similar ao que acontece na análise bidimensional. A figura 3.27 mostra os gráficos da classificação e densidade obtidos pela análise tridimensional do *mclust*. Comparando a análise 3D com a 2D, o fato de incluir a velocidade na análise, apenas mudou a classificação de quatro membros do modo 3 e os atribuiu ao grupo 2. A tabela 3.10 mostra respectivamente os gráficos de classificação e densidade obtidos na análise 3D.

3.3.4 Abell 1377

Análise 1D Para Abell 1377, após a inspeção do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases, optamos por rodar o *mclust* entre -1500 km/s e 4000 km/s com um corte radial em 4 Mpc. Pela análise do diagrama de espaço de fases identificamos que este grupo possivelmente tem uma interação no plano do céu e também apresenta multimodalidade na velocidade. Na análise unidimensional o *mclust* encontrou então dois modos, com picos em cz≈15482.87 km/s e cz≈18055.25 km/s. Na tabela 3.11 temos os parâmetros obtidos na análise em 1D. A figura 3.28 mostra o gráfico da classificação dos membros e do BIC obtidos na análise 1D.

Análise 2D A análise bidimensional de Abell 1377 não se mostrou satisfatória. Cinco grupos foram encontrados, sugerindo que existe interação no plano do céu. No painel da esquerda da figura 3.29, podemos ver que uma estrutura de círculos azuis fechados aparece dentro de uma maior formada por quadrados vermelhos abertos. Não há contaminação de membros do grupo de quadrados abertos vermelhos no grupo de círculos sólidos azuis,



Figura 3.19: Incertezas para os membros de A1035B obtida após análise tridimensional do mclust.

isto pode ocorrer na análise bidimensional, mas na análise tridimensional espera-se que haja alguma sobreposição de membros desses dois grupos. O grupo de triângulos verdes, que em duas dimensões aparece como um filamento, na analise tridimensional, vai se mostrar como sendo formado por galáxias em desvios para o vermelho muito diferentes. O painel da direita, por sua vez, mostra o BIC da análise bidimensional. Vários modelos concordam que o número de componentes é cinco, no entanto a diferença entre o maior BIC do modelo escolhido e o do modelo com segundo maior BIC (VEI) é pequena. Muitos modelos escolhem números diferentes de componentes. Portanto, não podemos confiar no número de modos encontrados pelo mclust em 2D. Como sabemos que em 1D o código encontrou dois modos com certa facilidade, baseados na análise do BIC, pretendemos, futuramente, rodar o mclust forçando dois modos em duas dimensões. A tabela apresenta os parâmetros da análise 2D do mclust.

Análise 3D Na análise tridimensional, o *mclust* encontrou 6 grupos. Agora com a análise incluindo a coordenada de velocidade, o quadro fica mais claro na figura 3.30. No painel da esquerda, o grupo de quadrados laranjas sólidos e o grupo de cruzes violetas aparecem próximos ao grupo de "xis" em azul-claro. Olhando para a coordenada da velocidade no painel da esquerda, vemos que o grupo de círculos azuis e o grupo de quadrados vermelhos aparecem juntos numa faixa de desvio para o vermelho mais próximo, enquanto que os grupos periféricos apresentam-se num desvio para o vermelho mais afastado. Essa análise deve então ser repetida considerando-se apenas o grupo de quadrados vermelhos e o de círculos azuis. No painel da direita temos o gráfico do BIC para análise tridimensional. Os valores do BIC nesse gráfico são ainda mais próximos do que os da análise 2D. A figura 3.31 mostra no painel da esquerda a densidade em escala de cores e à direita

Modelo EVE (elipsoidal, volumes e orienta)	Modelo EVE (enpsoidal, volumes e orientações iguais)				
Log verossimilhança	99.24				
Número de objetos	58				
BIC	137	7.58			
Modos	1	2			
Número de membros	29	29			
Média da RA (em escala)	-0.11	-0.03			
Média da DEC (em escala)	0.09	0.08			
Média de cz (em escala)	-0.66	-0.79			

Tabela 3.7: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise tridimensional de A1291A.

Tabela 3.8: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise unidimensional de A1750.

Modelo E (univariável, variância igual)						
Log Verossimilhança	ıça -583.82					
Número de objetos	73					
BIC	-1184.80					
Modos	1	2				
Número de membros	32	41				
Médias de cz (km/s)	24952.56	26228.52				

a densidade em curvas de nível para a análise 3D. No capítulo seguinte veremos que os dois grupos de maior densidade tem contrapartida em raios-X. O grupo de círculos sólidos azul-escuros tem 38 membros, enquanto que o de "xis" azul-claros tem 26 membros, estes são os dois grupos de maior densidade. Esse aglomerado não parece ser um bom candidato à interação após a análise do modelo de misturas de gaussianas. A tabela apresenta os parâmetros encontrados pelo *mclust* na análise 3D.

3.3.5 Abell 2067

Análise 1D Para Abell 2067, após a inspeção do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases, optamos por rodar o *mclust* entre -1100 km/s e 3100 km/s com um corte radial em 4 Mpc. O *mclust* encontrou então dois modos, com picos em cz \approx 22121.37 km/s e cz \approx 23587.84 km/s, cada um possuindo 160 e 250 membros respectivamente. Na tabela 3.14 temos os parâmetros obtidos na análise em 1D. A figura 3.32 mostra as classificações e o gráfico do BIC obtidos na análise 1D.

Análise 2D O *mclust* encontrou seis grupos na análise bidimensional desse aglomerado. Algumas das aglomerações encontradas sugerem interação no plano do céu. Na figura 3.33, estrutura constituída pelas galáxias representadas pelos triângulos verdes e a estrutura representada pelos quadrados laranjas estão associadas à Abell 2061. Os círculos sólidos azuis estão no centro de A2067. A tabela 3.15 apresenta os parâmetros obtidos na análise 2D.

Análise 3D Na análise tridimensional, o *mclust* encontrou 6 grupos. No painel da esquerda da figura 3.34, os grupos de triângulos verde-claros e o de "xis" azul-claros, que estão associados a A2061, são dois grupos que podem estar interagindo na linha de visada; eles possuem emissão em raios-X associada no Suzaku. A2067 parece ser composto de

Modelo EEV (elipsoidal, formas e volumes iguais)							
Log verossimilhança	134.35						
Número de objetos	73						
BIC	195.77						
Modos	1	2	3	4			
Número de membros	27	13	25	8			
Média da RA (graus)	202.82	202.92	202.72	202.63			
Média da DEC (graus)	-1.69	-1.95	-1.87	-2.02			

Tabela 3.9: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise bidimensional de A1750.

Tabela 3.10: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise tridimensional de A1750.

Modelo EEI (diagonal, volume e formas iguais)						
Log verossimilhança	-76.42					
Número de objetos	73					
BIC	-230.06					
Modos	1	2	3	4		
Número de membros	27	17	21	8		
Média da RA (em escala)	0.36	1.00	-0.49	-1.19		
Média da DEC (em escala)	1.10	-1.07	-0.15	-1.44		
Média de cz (em escala)	-0.19	-0.09	-0.15	-0.13		

mais de um grupo no plano do céu e também tem emissão em raios-X no Suzaku. A aplicação de um modelo dinâmico pode confirmar se esses grupos estão em interação. No painel da direita temos o gráfico do BIC da análise tridimensional. Novamente, os valores muito próximos em mais de um modelo indicam que devemos aplicar outro tipo de teste para confirmar o número de componentes encontradas. A figura 3.35 mostra no painel esquerdo a densidade em escala de cores e no painel direito a densidade em curvas de nível da análise tridimensional. A tabela 3.16 apresenta os parâmetros encontrados na análise 3D.

3.3.6 NSCS J121723+040720

Análise 1D No caso de NSCS J121723+040720, depois que inspecionamos o histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases, optamos por rodar o *mclust* entre -4000 km/s e 2000 km/s com um corte radial de 4Mpc. Na análise visual do espaço de fases, esse aglomerado apareceu como candidato à interação no plano do céu. O *mclust* encontrou então apenas um modo de velocidade, com pico de densidade em cz \approx 23237.6 km/s. A figura 3.36 mostra a classificação dos membros de NSCS J121723+040720 em apenas um modo de velocidade. A tabela 3.17 apresenta os parâmetros resultantes da análise unidimensional do *mclust*.

Análise 2D Na figura 3.37, podemos ver que o *mclust* encontrou dois grupos na análise bidimensional desse aglomerado: um grupo de galáxias ao norte, que, no plano do céu, está próximo de outro mais denso ao sul. No capítulo seguinte, veremos que apenas o grupo sul tem emissão em raios-X associada. A tabela 3.18 mostra os parâmetros obtidos na análise 2D do *mclust*.

Modelo E (univariável, variancia igual)					
Log Verossimilhança	-1943.38				
Número de objetos	228				
BIC	-3908.49				
Modos	1	2			
Número de membros	132 96				
Média de cz (km/s)	15482.87	18055.25			

Tabela 3.11: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise unidimensional de A1377.

Tabela 3.12: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise bidimensional de A1377.

Tabola 0.12. Talamot	Tabela 9.12. Tarametros obtidos pelo metasti na analise biumensional de 11911.						
Modelo VVV (elipsoidal, volume, forma e orientação variantes)							
Log verossimilhança		-311.63					
Número de objetos		228					
BIC -780.71							
Modos	1	2	3	4	5		
Número de membros	37	119	21	26	25		
Média da RA (graus)	176.84	177.07	178.00	175.34	176.96		
Média da DEC (graus)	55.74	55.63	55.00	55.35	54.73		

Análise 3D Na análise tridimensional, o *mclust* encontrou 2 grupos, assim como na análise bidimensional. Na figura 3.38, podemos observar que o grupo de círculos preenchidos azuis está no mesmo desvio para o vermelho do grupo de quadrados abertos vermelhos, que foi identificado como ZwCl 1215.1+0400. No capítulo seguinte, vamos discutir as propriedades da emissão em raios-X associada a esse aglomerado. A tabela 3.19 apresenta os resultados da análise 3D do *mclust*.

3.3.7 Abell 2399

Análise 1D No caso de A2399, após a inspeção do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases, optamos por rodar o *mclust* entre -3000 km/s e 3000 km/s com um corte radial de 4 Mpc. O *mclust* encontrou então três modos, com picos em cz \approx 15612.46 km/s, cz \approx 17447.06 e cz \approx 19274.63km/s. Na tabela 3.20, temos os parâmetros obtidos na análise em 1D. A figura 3.39 mostra a classificação dos membros e o gráfico do BIC obtidos na análise unidimensional do *mclust*.

Análise 2D Na análise bidimensional de A2399, o *mclust* obteve 4 subgrupos, como mostrado na tabela 3.21. Considerando-se as análises 1D e 2D, provavelmente temos interação tanto no plano do céu quanto na linha de visada. A figura 3.40 mostra no painel esquerdo a classificação em duas dimensões obtida pelo *mclust*. No painel direito temos o gráfico do BIC para a mesma análise.

Análise 3D Na análise tridimensional o *mclust* obteve 4 subgrupos, como mostrado no painel esquerdo da figura 3.41. O painel direito mostra o gráfico do BIC da análise, novamente com valores muito próximos. A tabela 3.22 mostra o resultado da análise 3D do *mclust*. O subgrupo mais numeroso com 77 membros está próximo a emissão em raios-X. Mais a frente veremos que a emissão em raios-X possui certa complexidade. Esse aglomerado já foi previamente investigado no óptico no levantamento *WINGS* (Ramella et

Modelo VVI (diagonal volume e formas variantes)						
Log verossimilhança			-164	4.75		
Número de objetos		228				
BIC		-552.11				
Modos	$egin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $					6
Número de membros	38	98	19	32	15	26
Média de RA (em escala)	0.00	0.19	-1.69	0.24	1.07	0.16
Média de DEC (em escala)	0.10	-0.08	-0.13	-1.29	0.08	-1.80
Média de cz (em escala)	-0.84	-0.82	-0.62	-0.67	-0.59	-0.65

Tabela 3.13: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise tridimensional de A1377.

Tabela 3.14: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise unidimensional de A2067.

Modelo E (univariável, variância igual)					
Log Verossimilhança	-3326.29				
Número de objetos	410				
BIC	-6676.64				
Modos	1	2			
Número de membros	160	250			
Médias de cz (km/s)	22121.37	23587.84			

al., 2007) [80]. No entanto, nenhuma subestrutura foi encontrada. Mais tarde Böhringer et al. (2010) encontrou uma bimodalidade em raios-X, a mesma foi confirmada na análise que mostraremos no capítulo seguinte. Forgaty et al. 2014 sugere que esse aglomerado esteja em estado de pós-fusão.

3.3.8 Abell 2428

Análise 1D Depois da análise do histograma de velocidades e diagrama de espaço de fases, aplicamos um corte de velocidade entre -1500 km/s e 4500 km/s num raio de 3.2 Mpc. Na análise unidimensional o *mclust* identificou dois modos de velocidades em Abell 2428. A tabela 3.23 mostra os parâmetros obtidos. Os dois grupos encontrados tem picos em 25146.91 km/s e 28258.60 km/s. Na figura 3.43, temos o gráfico mostrando a classificação dos membros pertencentes aos dois grupos encontrados pelo *mclust* em 1D.

Análise 2D Na figura 3.44, podemos ver que o *mclust* encontrou dois grupos, círculos azuis e quadrados vermelhos, que podem estar interagindo no plano do céu. No entanto, sabemos da análise unidimensional que esse aglomerado possui mais de um modo de velocidade. A análise tridimensional poderá esclarecer melhor se esse grupos encontrados em uma e em duas dimensões são os mesmos e se eles estão mesmo interagindo. Na tabela 3.24, temos os parâmetros encontrados pelo código nessa segunda análise de Abell 2428.

Análise 3D Na análise tridimensional o mclust encontrou 3 grupos. Na figura 3.45 vemos que os grupos vermelho e azul estão bastante separados no espaço de velocidades, portanto não interagem. No entanto, uma terceira componente, representada por triângulos verdes, interage com o grupo de quadrados vermelhos. Na tabela 3.25 são apresentados os parâmetros encontrados pelo mclust.

Modelo VVI (diagonal, volume e formas variantes)						
Log verossimilhança		-0.86				
Número de objetos		410				
BIC	-140.09					
Modos	1	2	3	4	5	6
Número de membros de cada modo	24	104	90	50	120	22
Média da RA (graus)	230.77	230.81	230.44	230.96	230.23	230.04
Média da DEC (graus)	30.86	30.95	30.68	31.13	30.59	31.05

Tabela 3.15: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise bidimensional de A2067.

Tabela 3.16: Parâmetros obtidos pelo *mclust* na análise tridimensional de A2067.

Modelo VVI (diagonal, volume e formas variantes)						
Log verossimilhança	-224.57					
Número de objetos		410				
BIC	-713.84					
Modos	1	2	3	4	5	6
Número de membros de cada modo	22	44	72	114	16	142
Média da RA (em escala)	0.25	0.67	-0.89	0.32	-1.58	-0.86
Média da DEC (em escala)	-0.05	0.66	-0.68	0.37	0.58	-0.60
Média de cz (em escala)	-0.63	-0.59	-0.54	-0.52	-0.57	-0.45

Tabela 3.17: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise unidimensional de NSCS J121723 + 040720.

Modelo X (normal univariável)				
Log Verossimilhança	-1408.76			
Número de objetos	171			
BIC	-2827.81			
Modos	1			
Número de membros	171			
Médias de cz (km/s)	23237.60			

Tabela 3.18: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise bidimensional de NSCS J121723 + 040720.

Modelo VEI (esférico, volume variante)					
Log Verossimilhança	5.74				
Número de objetos	171				
BIC	-24.50				
Modos	1 2				
Número de membros	69	102			
Média da RA (graus)	184.45	184.41			
Média da DEC (graus)	4.24	3.66			



Figura 3.20: Densidade dos membros de A1035B obtida após análise tridimensional do $\mathit{mclust.}$

Tabela 3.19:	Parâmetros	obtidos pe	elo <i>mclus</i>	t na	análise	tridimens	sional	de	NSCS	J121723
+ 040720.										

Modelo VII (esférico, volume variante)					
Log Verossimilhança	-178.10				
Número de objetos	171				
BIC	-423.03				
Modos	1	2			
Número de membros	72	99			
Média da RA (em escala)	0.21	0.06			
Média da DEC (em escala)	0.58	-0.90			
Média de cz (em escala)	-0.38	-0.41			



Figura 3.21: Nos paineis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação e a densidade dos membros de A1291A obtida pela análise unidimensional do mclust.



Figura 3.22: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação e a densidade dos membros de A1291A obtida pela análise bidimensional do mclust.

Modelo V (univariável, variâncias desiguais)					
Log verossimilhança	-1239.79				
Número de objetos	151				
BIC	-2519.71				
Modos	1	2	3		
Número de membros	12	112	27		
Média de cz (km/s)	15612.46	17447.06	19274.63		

Tabela 3.20: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise unidimensional de Abell 2399.



Figura 3.23: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação e a densidade dos membros de A1291A obtida pela análise tridimensional do mclust.



Figura 3.24: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação e a densidade dos membros de A1750 obtidas pela análise unidimensional do mclust.

Modelo VII (esférico, volume variante)						
Log verossimilhança		-74.53				
Número de objetos		151				
BIC	-224.33					
Modos	1	2	3	4		
Número de membros	43	79	11	18		
Média da RA (graus)	329.42	329.29	329.23	329.97		
Média da DEC (graus)	-7.85	-7.64	-6.94	-7.52		

Tabela 3.21: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise bidimensional de Abell 2399.



Figura 3.25: Em laranja temos a emissão em raios-X de A1750. Os círculos verdes representam a posição dos grupos encontrados pelo *mclust* na análise bidimensional de A1750.



Figura 3.26: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação e a densidade dos membros de A1750 obtidas pela análise bidimensional do mclust.



Figura 3.27: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação e a densidade dos membros de A1750 obtidas pela análise tridimensional do mclust.



Figura 3.28: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A1377 e o BIC obtidos pela análise unidimensional do mclust.

1					
Modelo VEI (diagonal, forma igual)					
Log verossimilhança		-97	.92		
Número de objetos		1;	51		
BIC	-301.21				
Modos	1	2	3	4	
Número de membros	77	25	34	15	
Média da RA (em escala)	0.00	-0.88	1.00	-035	
Média da DEC (em escala)	-0.09	0.07	0.40	1.70	
Médias de cz (em escala)	-0.79	-0.75	-0.79	-0.64	

Tabela 3.22: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise tridimensional de Abell 2399.



Figura 3.29: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A1377 e o BIC obtidos pela análise bidimensional do mclust.



Figura 3.30: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A1377 e o BIC obtidos pela análise tridimensional do mclust.

Modelo E (univariável, variância igual)					
Log Verossimilhança	-3326.29				
Número de objetos	410				
BIC	-6676.64				
Modos	1 2				
Número de membros	160	250			
Médias de cz (km/s)	22121.37	23587.84			

Tabela 3.23: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise unidimensional de Abell 2428.



Figura 3.31: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a densidade em escala de cores e a densidade em curvas de nível para A1377 obtidas na análise tridimensional do mclust.



Figura 3.32: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A2067 e o BIC obtidos pela análise unidimensional do mclust.



Figura 3.33: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A2067 e o BIC obtidos pela análise bidimensional do mclust.



Figura 3.34: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A2067 e o BIC obtidos pela análise tridimensional do mclust.

Modelo VII (diagonal, volume variante)						
Log Verossimilhança	-178.10					
Número de objetos	171					
BIC	-423.03					
Modos	1	2				
Número de membros	72	99				
Média da RA (em escala)	0.21	0.06				
Média da DEC (em escala)	0.58	-0.90				
Média de cz (em escala)	-0.38	-0.41				

Tabela 3.24: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise bidimensional de Abell 2428.



Figura 3.35: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a densidade em escala de cores e a densidade em curvas de nível para A2067 obtidas na análise tridimensional do mclust.



Figura 3.36: Classificação dos membros de NSCS J121723+040720 obtida pela análise unidimensional do mclust.



Figura 3.37: Classificação dos membros de NSCS J121723+040720 obtida pela análise bidimensional do mclust.



Figura 3.38: Classificação dos membros de NSCS J121723 + 040720 obtida pela análise tridimensional do mclust.



Figura 3.39: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A2399 e o BIC obtidos pela análise unidimensional do mclust.



Figura 3.40: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A2399 e o BIC obtidos pela análise bidimensional do mclust.

1					
	Modelo VVV (elipsoidal, volume e formas variantes)				
	Log verossimilhança	-60.40			
	Número de objetos	102			
	BIC	-254.93			
	Modos	1	2	3	
	Número de membros	56	23	23	
	Média da RA (em escala)	-0.07	0.60	0.23	
	Média da DEC (em escala)	0.15	-0.17	-1.40	
	Média de cz (em escala)	-0.59	-034	-0.43	

Tabela 3.25: Parâmetros obtidos pelo mclust na análise tridimensional de Abell 2428.



Figura 3.41: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a classificação dos membros de A2399 e o BIC obtidos pela análise tridimensional do mclust.



Figura 3.42: Nos painéis da esquerda e da direita temos respectivamente a densidade em escala de cores e a densidade em curvas de nível para A2399 obtidas na análise tridimensional do mclust.



Figura 3.43: Classificação dos membros de Abell 2428 obtida pela análise unidimensional do mclust.



Figura 3.44: Classificação dos membros de Abell 2428 obtida pela análise bidimensional do mclust.



Figura 3.45: Classificação dos membros de Abell 2428 obtida pela análise tridimensional do mclust.

4 Análise em raios-X

4.1 Download e redução dos dados e obtenção de parâmetros físicos.

Em nossa análise demos preferência a dados do XMM-Newton em detrimento do Chandra, porque o XMM possui campo de visão maior. Para efeito de comparação, no desvio para o vermelho médio da nossa amostra (≈ 0.07) o campo de visão do ACIS-I, que é o maior detector do Chandra, cobre um área de 1.29 Mpc x 1.29 Mpc e o ACIS-S cobre uma área de 0.65 Mpc x 0.65 Mpc. Já os detectores EPIC do XMM cobrem em média 2.44 Mpc x 2.44 Mpc. Utilizamos dados do XMM-Newton para cinco objetos (A1035, A1291, A1750, A2399 e A2428) e do Chandra para três (ZwCl 1215, A1377 e A1750N) objetos. Como já mencionando anteriormente, A2399 também possui observação no XMM-Newton que será analisada futuramente.

XMM-Newton A obtenção dos dados públicos do XMM-Newton pode ser feita através da página "XMM-Newton Science Archive Search"⁴. Para fazer download dos dados devese fazer o *login* na página da ESA. Após digitar o nome do alvo e clicar em *submit*, uma nova página mostrará todas as observações disponíveis para aquele alvo, bem como algumas informações sobre as observações. Pelo fato de aglomerados de galáxia serem fontes extensas é importante termos observações com tempo de exposição maior que 10000 segundos. O botão *REPROCESS* fornece dados pré-reduzidos, mas para este trabalho nós utilizamos os dados brutos e reprocessamos para assegurar que tudo seria feito com as ferramentas e arquivos de calibração mais recentes do XMM-Newton. Nós utilizamos apenas dados da European Photon Imaging Camera (EPIC; Strüder et al., 2001; Turner et al., 2001) [93] [95]. Os dados do XMM-Newton foram processados com o XMM Extended Source Analysis Software (XMM-ESAS: Snowden et al. (2008)) utilizando o XMM-Newton Scientific Analysis System (XMM-SAS) versão 16.1.0. Os arquivos de calibração, CCF, foram obtidos com a tarefa rsync e as listas dos CCF para as nossas observações foram criadas através da tarefa *cifbuild*. A seguir aplicamos a tarefa *odfingest* para extrair informação sobre a configuração instrumental e dos arquivos de calibração, essas informações são armazenadas então num arquivo de sumário, SUM.SAS. Os arquivos de eventos foram associados aos arquivos de calibração com as tarefas *epproc* e *emproc*. Os arquivos de eventos listam informações coletadas pelos detectores EPIC PN, MOS1 e MOS2. Abaixo temos algumas das informações listadas nesses arquivos.

- TIME: Tempo do Evento em segundos (*read-out time*).
- RAWX, RAWY: Coordenadas do *pixel* do evento na CCD.
- DETX, DETY: Coordenadas do detector.
- X, Y: Coordenadas projetadas do céu, relativas a posição de apontamento nominal.
- PHA: Pulse Height Analizer, ou o canal de eventos sem correções.
- PI: *Pulse Height Invariant*, ou a energia do evento corrigida e recombinada (arquivo que é utilizado na análise espectral).

 $^{^{4}} http://nxsa.esac.esa.int/nxsa-web/\# search$

- FLAG: Qualidade do evento (0 é a melhor).
- PATTERN: Código do padrão inteiro de 1-byte (0 = Únicos, 1-4 = Duplos, 5-8 = Triplos e 9-12 = Quádruplos). Quando um fóton libera energia em apenas um *pixel* da CCD o evento é considerado único, se ele libera em dois *pixels*, o evento é duplo e assim por diante. Mais de 90% dos eventos da EPIC são únicos e duplos.
- PAT_SEQ: Sequência padrão, significa a distância do evento ao evento predecessor.
- CCDNR: Número da CCD (1-12).

A análise de fontes extensas do XMM-Newton é bastante longa e complexa. Isso acontece por causa de variações espaciais nas propriedades dos detectores e também pelo fato do *background* exercer uma influência importante nesse tipo de fonte.

O background no XMM-Newton é composto em parte por prótons de alta energia provenientes do Sol e tem fluxo variável durante o tempo. Observando as curvas de luz, os *flares* solares se apresentam como picos, que podem ser cerca de 10 vezes maiores que o fluxo médio. Nós limpamos esse tipo de emissão dos nossos dados excluindo emissões maiores que 10 keV para MOS e PN. Os dados foram filtrados em bins de 64 segundos, a imagem foi recursivamente limpa até que cada bin tivesse aproximadamente o mesmo número de contagens. Fótons com energia menor que 1 keV foram excluídos, pois os filtros *thin* e *medium*, utilizados nos diferentes modos de observação, apresentam diferenças abaixo de 0.7 keV. Após o processo de redução apenas A1291 sofreu perda de tempo a ponto de afetar na análise final, este foi o único aglomerado a ficar com tempo de exposição efetivo menor que 10000s. A exposição final pode ser encontrada na tabela 4.1.

Para esta análise foram selecionados eventos com PATTERN de 0-12 para MOS e 0-4 para PN. A diferença nos padrões acontece principalmente por causa da diferença no tamanho dos *pixels* das duas câmeras. Apenas os eventos com FLAG=0 foram selecionados, assim filtramos os eventos ruins como os raios cósmicos e eventos que ocorrem fora do campo de visão. Tais FLAGs e PATTERNs são sugeridas no User's guide to the XMM-Newton Science ⁵. Após esses procedimentos temos os arquivos de *Good Time Interval* (GTI). Depois disso podemos trabalhar com os arquivos de *background*, já limpos e sem *flares*. Esses são escolhidos de acordo com o modo e o filtro utilizados na observação. O *script skycast* de Andy Read foi utilizado para rotacionar e alinhar os *backgrounds* com as observações.

Outra componente importante do *background* é o fundo astrofísico, que é causado por uma emissão *suave* menor que 1.5 keV devida à bolha local e por uma emissão *dura*, que é causada principalmente por AGN's em diferentes desvios para o vermelho. Esta última pode ser eliminada a olho subtraindo-se as regiões das AGN's com auxílio do DS9 ou aplicando algum código de detecção de fontes. Porém não é tão simples remover a componente *suave*, pois esse tipo de emissão varia ao longo do céu. (Snowden et al., 1997) [92]. Esse problema é resolvido definindo-se um anel de *background* local ao redor da fonte.

Para analisar o espectro no XSPEC v.12.10.0 (Arnaud 1996) [4], precisamos gerar duas matrizes de resposta para o detector. O XSPEC requer uma caracterização da resposta do detector para simular um espectro de saída observado pela EPIC. A função de resposta dá a probabilidade de um fóton incidente com energia E ser detectado num determinado canal I. A função discreta pode ser calculada como produto da *Redistribution*

 $^{{}^{5} {\}rm https:} / xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/sas_usg/USG/$

Matrix File (RMF) por uma Auxiliary Response File (ARF). Tais matrizes nos poupam o trabalho de lidar com a complexidade da resposta do detector EPIC que varia ao longo do campo de visão. Para gerar a RMF e a ARF foram utilizadas respectivamente as tarefas *rmfgen* e arfgen. Nós ajustamos um modelo de gás quente e difuso, MEKAL (Kaastra & Mewe, 1993; Liedahl et al., 1995) [44] [53]. Também utilizamos um componente de absorvição fotoelétrica para a Via-Láctea, PHABS. Os valores para coluna de densidade de hidrogênio foram mantidos fixos no ajuste espectral e são da Leiden/Argentine/Bonn (LAB) HI-survey (Karberla et al., 2005) [45]. Temperatura e abundância foram mantidos livres. Foram utilizadas as abundâncias de Asplund et al. (2009) (ASPL) [5].

No apêndice A temos as figuras que mostram as regiões de onde foram extraídos os *backgrounds* e as fontes que foram excluídas das análises.

Chandra A obtenção das imagens do Chandra pode ser feita através da plataforma ChaSeR ⁶. Selecionamos os dados com maior tempo de exposição, maiores que 10000 segundos e fizemos os downloads das pastas primárias e secundárias. Para analisar as imagens do Chandra foi utilizado o pacote CIAO 4.9. As curvas de luz foram filtradas entre 0.7 e 7.0 keV. As matrizes de resposta ARF e RMF foram criadas na faixa de 0.7 a 7.0 keV em bins de 10 eV. A RMF foi criada do canal 1 ao 1024 em passos de 1. Os dados foram agrupados em grupos de 20 contagens. Os arquivos de evento blank sky do CALDB 4.7.8 foram utilizados no tratamento do background do Chandra. O background foi reprojetado para ficar ajustado com as observações. Com o comando dmextract os dados foram extraídos do arquivo de eventos para gerar uma curva de luz em bins de 100 segundos. Fizemos o mesmo corte de energia entre 0.7 e 7.0 keV para o background. Criamos então os arquivos GTI com a tarefa lc_sigma_clip . Os arquivos PI foram gerados com dmextract.

Imagens corrigidas pelo mapa de exposição foram produzidas com a tarefa *fluximage*, para as observações do ACIS I, eliminando assim efeitos de *vignetting*. Para excluir as fontes pontuais das imagens, nós utilizamos a ferramenta *celldetect* do CIAO com *expratio* igual a 0.9 como sugerido no *threads*⁷. Essa é a proporção da exposição média do *background* ao redor da fonte pontual em relação à exposição da fonte extensa. O arquivo limpo e sem as fontes pontuais foi então utilizado para ajuste de espectro com o *software XSPEC*, versão 12.10.0. (Arnaud 1996). A temperatura e a abundância foram os parâmetros livres da análise. Nós utilizamos as abundâncias de ASPL. Os valores obtidos da LAB HI-Survey foram mantidos fixos. Todas as imagens do Chandra foram obtidas no modo VFAINT.

4.2 Análise das temperaturas e metalicidades do ICM.

Piffaretti et al. (2011) [75], estudaram as propriedades dos aglomerados do Meta-Catalogue of X-Ray galaxy clusters (MCXC). Esse catálogo foi construído com 1743 aglomerados observados pelo ROSAT. O catálogo MCXC fornece as propriedades dos aglomerados de maneira padronizada. As luminosidades em raios-X foram estimadas na banda 0.1 - 2.4 keV em L_{500} e as massas totais em M_{500} . O modelo cosmológico utilizado no MCXC foi o Λ CDM com $H_0 = 70$ km/s/Mpc, $\Omega_M = 0.3$ e $\Omega_{\Lambda} = 0.7$. Todos os aglomerados que tem emissão em raios-X da nossa amostra fazem parte do MCXC. A tabela 4.2 apresenta as informações obtidas a partir desse catalogo para nossa amostra.

⁶http://cda.harvard.edu/chaser/

⁷http://cxc.harvard.edu/ciao/threads/celldetect/
NOME	ΤΕΙ ΕςΟΌΡΙΟ	DETECTOR	NH (LAB)	TEMPO EFETIVO
NOME	TELESCOPIO	DETECTOR	(cm^{-2})	(seg)
A1035	XMM-Newton	EPIC	1.08E + 20	15946.710
A1291	XMM-Newton	EPIC	1.03E + 20	8469.227
A1750	XMM-Newton	EPIC	2.35E + 20	25098.050
A2399	XMM-Newton	EPIC	3.05E + 20	85212.400
A2428	XMM-Newton	EPIC	4.56E + 20	10272.530
ZwCl 1215	Chandra	ACIS I	1.74E + 20	12000.300
A1750N	Chandra	ACIS I	2.35E + 20	19510.407
A1377	Chandra	ACIS S	8.52E+19	43345.363

Tabela 4.1: Instrumentos, colunas de densidades hidrogênio e tempos de exposição resultantes após a redução das imagens.

A primeira coluna contém os nomes dos aglomerados com a identificação do MCXC. A segunda, terceira e quarta colunas contém respectivamente as coordenadas de ascensão reta, declinação e desvio para o vermelho. A quinta e sexta colunas apresentam respectivamente L_{500} e M_{500} . Por fim, a última coluna mostra a nomenclatura Abell e Zwicky dos aglomerados. Mais abaixo na tabela 4.3 temos os valores de Lopes et al. (2009) [58] para os aglomerados da nossa amostra, onde L_{500} foi obtido a partir de dados do ROSAT e T_x obtido a partir da relação $L_x - T_x$.

Tabela 4.2: Informações contidas no MCXC para os aglomerados da nossa amostra.

MCYC	RA (J2000)	DEC (J2000)	2000)		M_{500}	NOME	
MICAU	h: m: s	d: m: s		$10^{37} \ { m W}$	$10^{14}~M_{\odot}$		
J1032.2+4015	10:32:14.8	+40:15:53	0,0790	0,8165	1,7119	A1035	
J1132.3+5558	11:32:19.6	+55:58:44	0,0527	0,3050	0,9561	A1291	
J1330.8-0152	13:30:49.9	-01:52:22	0,0852	2,1278	3,0567	A1750	
J1147.3+5544	11:47:20.7	+55:44:36	0,0510	0,1885	0,7138	A1377	
J1523.1+3050	15:23:07.9	+30:50:42	0,0756	0,4416	1,1796	A2067	
J1217.6+0339	12:17:40.6	+03:39:45	0,0766	2,7448	$3,\!5915$	ZwCl1215	
J2157.4-0747	21:57:25.8	-07:47:41	0,0579	0,4472	1,2033	A2399	
J2216.2-0920	22:16:15.5	-09:20:24	0,0825	$1,\!4387$	2,4124	A2428	

ABELL 1035 Para Abell 1035 o perfil de temperatura foi extraído nos dois picos de luminosidade em raios-X. O pico mais ao norte está próximo a galáxia SDSS J103213.95 + 401616.4 em cz ≈ 23280 km/s, $\alpha = 158.0576$, $\delta = 40.2708$. Essa galáxia também emite em rádio e no NED é classificada como cD e *Brightest Cluster Galaxy* (BCG). Embora a distribuição em raios-X desse aglomerado pareça mostrar um sistema duplo em interação, o pico sul está próximo à galáxia SDSS J103215.27+401012.2 em cz ≈ 20130 km/s, $\alpha = 158.0636$ e $\delta = 40.1701$. Essa galáxia emite em rádio e no NED é classificada como BCG também. No processo de análise da imagem utilizamos normalização 0.66 para MOS1, 0.55 para MOS2 e 0.66 para PN. O ajuste do perfil de temperatura foi realizado entre 0.5 e 4 keV. Para MOS e PN realizamos um corte entre 1.2 e 1.9 keV a fim de excluir as linhas fortes de Al e Si (Laganá et. al., 2015) [48]. Abell 1035B parece bem mais relaxado que Abell 1035A, que é a estrutura mais ao sul. A figura 4.1 apresenta o perfil de temperatura e abundância de A1035A e B, que no gráfico aparecem

RA (J2000)	DEC (J2000)	M ₅₀₀	Error M_{500}	L_{500}	Error L_{500}	Tx	NAME
Deg	Deg	$10^{14} M_{\odot}$	$10^{14}~M_{\odot}$	$10^{37} \ {f W}$	$10^{37} \ {f W}$	keV	
158,059	40,247	2,26	0,66	0,729	0,092	2,8	A1035B
173,081	55,979	14,76	1,35	0,386	0,120	2	A1291A
202,707	-1,872	9,22	0,74	1,995	0,245	4,6	A1750
176,836	55,743	5,46	$0,\!63$	0,267	0,066	1,7	A1377
230,783	30,845	0,75	0,25	0,251	0,068	1,6	A2067
184,366	4,156	0,61	0,22	0,088	0,097	0,7	NSCS J121723+040720
329,357	-7,795	4,10	0,43	0,636	0,095	2,6	A2399
334,064	-9,340	1,90	0,42	1,528	0,181	4	A2428

Tabela 4.3: Informações contidas em Lopes et al. (2009) para os aglomerados da nossa amostra.

como A1035S e A1035N, respectivamente. As linhas tracejadas representam as médias da temperatura e da metalicidade dos aglomerados. A temperatura e a metalicidade média obtidas com os três primeiros anéis do ajuste de A1035B são respectivamente 2.54 keV e 0.60 Z_{\odot} . Para A1035A o primeiro anel do ajuste já cobre quase toda emissão do gás do aglomerado. Eliminamos o segundo anel do ajuste, pois já havia contaminação por parte da emissão de A1035B nesse anel. A temperatura e a metalicidade média do único anel de A1035A são respectivamente 2.16 keV e 0.58 Z_{\odot} . O fato de A1035A ter uma morfologia assimétrica em raios-X poderia indicar que ele é um aglomerado não relaxado. A metalicidade é relativamente alta quando comparada a valores típicos de aglomerados, ~ 0.3 Z_{\odot} . Existe então a possibilidade de que a morfologia assimétrica do gás seja resultado de uma fusão. Para confirmar esta hipótese, seria interessante se obter o mapa de temperatura de A1035A, assim como a análise do brilho superficial e aplicação de alguma simulação hidrodinâmica. A figura 4.2 mostra as regiões anulares utilizadas no ajuste do perfil e cálculo das médias de temperatura e metalicidade.

ABELL 1291 Após o processo de redução da imagem, o tempo de exposição diminuiu bastante, ficando menor que 10000 segundos. A emissão em raios-X de Abell 1291 é muito fraca e tem duas galáxias próximas a seu pico. Uma delas é SDSS J113222.74+555818.5 em cz $\approx 15000 \text{ km/s}$, $\alpha = 173.0948 \text{ e} \delta = 55.9718$. Essa galáxia é uma fonte de rádio, Seyfert I e aparece também como candidata a cD. A segunda galáxia é SDSS J113223.18+555803.0 em cz $\approx 15450 \text{ km/s}$, $\alpha = 173.0967 \text{ e} \delta = 55.9674$. Esta galáxia é classificada como cD e BCG no NED. Embora o mclust tenha identificado dois grupos na linha de visada quase que perfeitamente sobrepostos, sendo o mais próximo centrado em cz $\approx 15360 \text{ km/s}$ e o segundo mais próximo em cz $\approx 17610 \text{ km/s}$, não é possível identificar emissão em raios-X para o grupo óptico mais afastado, pois os dois grupos estão sobrepostos na linha de visada. Pelo fato do gás intraglomerado (ICM) ser um meio opticamente fino não é possível dizer se há emissão sobreposta do gás na linha de visada. Devido ao fato da emissão ser fraca e pouco profunda, não conseguimos ajustar o perfil de temperatura desse aglomerado. No geral a emissão é bastante concentrada e simétrica ao redor da BCG.

ABELL 1750 A emissão em raios-X de A1750 parece indicar a interação de dois grupos. A1750C, mais ao sul, tem a galáxia SDSS J133050.59-015143.0 em cz ≈ 26370 km/s, $\alpha=202.7108$ e $\delta=-1.8619$, classificada como BCG e próxima a seu pico. A1750N, o grupo mais ao norte, tem SDSS J133111.02-014338.2 em cz ≈ 25080 km/s, $\alpha=202.7951$ e $\delta=-1.7303$, próxima a seu pico. Essa galáxia também é classificada como BCG e faz parte do trio ZwCl 319. O *mclust* identificou dois modos de velocidade para este aglomerado





Figura 4.1: Perfil de temperatura e metalicidade para Abell 1035B (norte) e Abell 1035A (sul).

separados por apenas 1276 km/s. Para este aglomerado utilizamos normalização 0.89019 para MOS1, 0.906635 para MOS2 e 1.03674 para PN. O ajuste espectral foi feito entre 0.5 e 7 keV para A1750N e A1750C. Pretendemos refazer essa análise considerando uma faixa de temperatura menor e cortando as linhas de Al e Si, como fizemos na seção anterior, para verificarmos se a qualidade do ajuste melhora. Os perfis de temperatura foram centrados nos dois picos identificados em raios-X. A temperatura e a metalicidade média de A1750C são respectivamente 4.08 keV e 0.33 Z_{\odot} . O perfil de temperatura é praticamente isotérmico até ≈ 0.23 Mpc, tem uma queda perto de 0.3 Mpc e então começa a crescer novamente. Já a temperatura e a metalicidade média de A1750N são respectivamente 2.91 keV e 0.17 Z_{\odot} . O perfil de temperatura também é aproximadamente isotérmico até 0.27 Mpc, sofrendo uma queda em 0.33 Mpc e então voltando a crescer. Os perfis de A1750N e C são apresentados na figura 4.3 e as linhas tracejadas representam as médias das



Figura 4.2: Regiões anulares utilizadas para extrair os perfis de temperatura e metalicidade para Abell 1035N e S. As regiões circulares pretas foram excluídas

temperaturas e metalicidades. A figura 4.4 mostra as regiões utilizadas para fazer os perfis de temperatura e metalicidade. Nenhum dos dois aglomerados apresenta indício de *cool* core e seus perfis, um tanto quanto complexos, sugerem que cada um destes aglomerados ainda esteja se recuperando de um evento fusão. O fato de ambos os perfis indicarem um crescimento de temperatura nos anéis externos evidencia uma compressão do gás entre esses dois aglomerados. No entanto, como o perfil de temperatura faz uma média azimutal no anel, acaba suavizando as variações de temperatura resultantes do choque dos aglomerados. De fato, esses sistemas foram estudados por Bulbul et al. (2016) [17] com os dados do Chandra, XMM-Newton e Suzaku, que confirmaram uma região de acréscimo de temperatura entre A1750C e A1750N de 5.49 keV comprovando então uma interação inicial. No entanto o fato das morfologias das emissões ainda se mostrarem bastante simétricas, indica que esses aglomerados estejam num estado de pré-fusão. Belsole et al. (2004) [10] estimou que esses aglomerados vão se fundir em aproximadamente 1 gigaanos. Os autores também extraíram o espectro de A1750C encontrando temperatura de 3.87 ± 0.10 keV e o espectro de A1750N encontrando a temperatura de 2.84 ± 0.12 keV. Eles também extraíram o espectro na região entre os dois aglomerados e encontraram temperatura de 5.12 ± 0.8 keV. Uma terceira concentração de gás quente aparece mais ao sul de A1750C nas imagens de amplo campo de visão do ROSAT e também foi observada pelo Chandra.





Figura 4.3: Perfil de temperatura e metalicidade para Abell 1750 norte e central.

ABELL 1377 A emissão em raios-X de A1377 é extremamente assimétrica e apresenta muitos picos de luminosidade. Entre eles destacamos os dois principais, SDSS J114721.38 + 554348.6 em cz ≈ 15480 km/s, α =176.8386d, δ =55.7302d e SDSS J114715.64 + 554301.4 em cz ≈ 15780 km/s, α =176.8149d e δ =55.7174d. Por ser uma imagem feita com um detector ACIS-S (FOV:8'x 8'), ela enquadra apenas uma parte central do gás do aglomerado. O ajuste espectral para essa região foi bastante complicado e não conseguiram ajustar um modelo wabs*apec para emissão de plasma, com os mesmos dados do Chandra. A temperatura e a metalicidade encontradas por eles, 1.7 ± 0.2 keV e 0.09 ± 0.04 Z_☉ respectivamente, são baixas em relação ao que normalmente se encontra em aglomerados, sugerindo então que este seja um aglomerado que ainda não teve tempo de relaxar e também de enriquecer o gás. Isso explicaria também o grande número de grupos encontrado pelo *mclust*. Na figura 4.5 temos o mapa de temperatura obtido para A1377 por esses autores, mostrando um aumento de temperatura no lado esquerdo da



Figura 4.4: Regiões anulares utilizadas para extrair os perfis de temperatura e metalicidade para Abell 1750N e C. As regiões circulares pretas foram excluídas

imagem.



Figura 4.5: Mapa de temperatura de Lakhchaura & Singh (2004) para A1377 com dados do Chandra

ABELL 2067 No ROSAT a emissão do ICM aparece basicamente mais concentrada em dois grupos. O grupo sul está associado a A2061 e o grupo norte a Abell 2067. De

acordo com a análise 3D do *mclust*, A2061 possui dois modos possivelmente em interação na linha de visada e A2067 parece está interagindo no plano do céu com outro grupo. Esse aglomerado também possui imagem pública no SUZAKU. O pico da emissão de A2067 está próximo a SDSS J152308.40+305238.9 em cz \approx 22020 km/s, α =230.7850 e δ =30.8775, que é uma galáxia cD e BCG. Marini et al. (2004) [62] estudou A2061 e A2067 com dados do BeppoSAXsatellite (Boella et al., 1997a) [14] e fez perfis de temperatura para os dois aglomerados, figura 4.6. Na análise do gás nenhuma interação foi identificada entre A2067 e A2061, no entanto eles se encontram em desvios para o vermelho muito próximos e de acordo com Rines & Diaferio (2006) [83] eles estão gravitacionalmente ligados, tratando-se então de um cenário de pré-fusão. Porém, da nossa análise do mclust sabemos que A2061 muito provavelmente está interagindo na linha de visada, e de fato o mapa de temperatura desse aglomerado, também produzido por Marini et al. (2004) [62], apresenta uma região de crescimento brusco de temperatura que pode ter sido causada pela interação com algum grupo em queda. Para confirmar estes cenários de interação se faz necessário o uso de modelos dinâmicos e simulações hidrodinâmicas. A temperatura e a metalicidade média de A2061 são 4.52 \pm 0.48 keV e 0.10 \pm 0.09 Z_{\odot} respectivamente e para A2067 1.44 \pm 0.38 keV e 0.18 \pm 0.42 Z_{\odot} .



Figura 4.6: Perfis de temperatura de A2061 e A2067 à esquerda e à direita, respectivamente. Dados de Marini et al. (2004)

NSCS J121723+040720 A análise 3D do mclust, mostra a densidade de galáxias de NSCS J121723+040720 bem menor que a de ZwCl 1215. Analisando a imagem do ROSAT, vemos que NSCS J121723+040720 tem emissão muito fraca em raios-X apenas numa pequena área do centro. Por sua vez, ZwCl 1215 foi observado tanto com o XMM-Newton quanto com o detector ACIS-I do Chandra. A análise da imagem do XMM-Newton será realizada futuramente. Pra o Chandra, produzimos a imagem corrigida pelo mapa de exposição para este aglomerado, a qual mostramos mais à frente na figura 4.16. A imagem do Chandra mostra uma emissão aparentemente bem comportada, típica de um aglomerado relaxado. O perfil de temperatura, de metalicidade e de brilho superficial de ZwCl 1215 foi obtido com os dados do Chadra na ACCEPT survey (Hoffer et al., 2012) [40]. Em nossa própria análise, inspecionamos a imagem a fim de buscar traços de interação nesse aglomerado. Em seguida, extraímos o espectro de um setor circular do ACIS I, chip 0. Nós também ajustamos o modelo Tbabs*Apec no XSPEC. A temperatura e a metalicidade obtidas para este setor foram 6.92 ± 0.35 keV e $0.39 Z_{\odot}$ com χ^2 reduzido de 1.14. O pico em raios-X de ZwCl 1215 está próximo a BCG SDSS J121741.12+033921.0 em cz ≈ 22020 km/s, $\alpha = 184.4213$ e $\delta = 3.6558$. A figura 4.7 apresenta os perfis de temperatura e metalicidade obtidos pela ACCEPT survey (Cavagnolo et al., 2009). De acordo com esse levantamento a temperatura média é 6.62 keV e a metalicidade média é $0.3 Z_{\odot}$. O perfil de temperatura é praticamente isotérmico quando consideramos os erros.

Em nossa análise nós verificamos que ZwCl 1215 não apresenta indicativo de *cool core*, podendo então ter sofrido uma interação forte num passado próximo que destruiu o seu *cool core*.



Figura 4.7: Nos paineis da esquerda e da direita temos respectivamente os perfis de temperatura e metalicidade de ZwCl 1215 obtidos em Hoffer et al. (2012).

ABELL 2399 ABELL 2399 possui dois picos de luminosidade em raios-X próximos ao centro. Um está próximo a SDSS J215729.42-074744.5 em cz \approx 17370 km/s, α =329.3726 e δ =-7.7957. Essa galáxia é também classificada como BCG no NED. O outro está próximo a SDSS J215733.47-074739.2 em cz \approx 17040 km/s, α =329.3894, δ =-7.7942. O ajuste espectral do perfil de temperatura foi feito entre 0.5 e 4 keV, com um corte entre 1.2 e 1.9 keV para as três câmeras. As normalizações utilizadas foram de 0.51 para MOS1, 0.46 para MOS2 e 0.59 para PN. A temperatura e a metalicidade médias de A2399 são respectivamente 3.85 keV e 0.73 Z_{\odot} . A metalicidade é relativamente elevada em relação aos valores típicos de aglomerados. A morfologia do ICM desse aglomerado é bastante assimétrica. Os perfis de temperatura e metalicidade sofrem variações bruscas. As características desse aglomerado são melhores explicadas por um cenário de pós-fusão. O perfil de temperatura de A2399 no painel superior esquerdo da figura 4.8 mostra uma região de aumento de temperatura num raio de 0.2 Mpc, as linhas tracejadas cinzas mostram a média da temperatura e da metalicidade. A obtenção do mapa de temperatura para esse aglomerado pode nos confirmar se realmente existe uma zona de choque e nos fornecer a temperatura da região com maior precisão. Na figura 4.9 temos as regiões anulares utilizadas para produzir o perfil de temperatura e metalicidade.

ABELL 2428 SDSS J221615.59-091959.7 em cz ≈ 25200 km/s, $\alpha=334.0631$ $\delta=-9.3330$ é classificada como BCG no NED e está próxima ao pico de luminosidade em raios-X de A2428. No ajuste espectral para obtenção do perfil de temperatura utilizamos uma faixa de 0.5 a 7 keV. As normalizações utilizadas foram 0.71 para MOS1, 0.58 para MOS2 e 0.64 para PN. A figura 4.8 mostra os perfis de temperatura e metalicidade para A2399 e A2428. A temperatura e a metalicidade médias de A2428 são respectivamente 3.44 keV e 0.48 Z_{\odot} e são representadas pelas linhas tracejadas nos gráficos. O perfil de temperatura sofre uma queda no centro que pode indicar *cool core* (Sanderson et al., 2006a) [87] . O *cool core* só existe em aglomerados que não sofreram nenhum grande evento de fusão recentemente. No entanto, isso não significa que o aglomerado é dinamicamente relaxado, já que eventos de fusão menores não são suficientes para desfazer o *cool core*. Com exceção dessa queda no centro, o aglomerado possui perfil de temperatura isotérmico. A figura 4.10 mostra a região utilizada para produzir os perfis de temperatura e metalicidade de A2428.



Figura 4.8: Perfis de temperatura e metalicidade para Abell 2399 e Abell 2428.



Figura 4.9: Regiões anulares utilizadas para extrair os perfis de temperatura e metalicidade para Abell 2399. As regiões circulares verdes foram excluídas



Figura 4.10: Regiões anulares utilizadas para extrair os perfis de temperatura e metalicidade para Abell 2428. As regiões circulares pretas foram excluídas

4.3 Comparação entre a distribuição do ICM e a análise do óptico em 3D.

Nesta seção sobrepusemos os resultados dos grupos encontrados pelo *mclust* em 3D nas imagens disponíveis em raios-X. Em alguns casos como ZwCl 1215, A2399 e A2428 adicionamos uma imagem diminuída para melhor comparação do óptico com o raio-X. No geral o *mclust* funcionou bem para a nossa amostra, encontrando sempre grupos de galáxias associados a emissão do gás. No caso de A1035 vemos claramente que os dois grupos encontrados estão associados as duas concentrações encontradas em raios-X. A1291 apresenta claramente um dos grupos do mclust associado à emissão em raios-X também. Para A1750 limitamos a análise do óptico à imagem em raios-X, pois nosso interesse inicial também era estudar os efeitos da interação do gás nas galáxias. Essa região tem um filamento do qual participam os três aglomerados A1750N, A1750C e A1750S, os dois primeiros já estão numa pré-fusão. A1377 também teve um grupo encontrado associado à emissão em raios-X. A análise do *mclust* para A2067 encontrou muitos grupos, com dois desses grupos estando claramente associados a emissão do gás de A2061 e A2067. Para NSCS J121723+040720 não encontramos emissão em raio-X significativa na imagem do ROSAT, mas o grupo mais ao sul encontrado pelo *mclust* foi identificado como ZwCl 1215 que tem imagem no Chandra e no XMM-Newton. A2399 também teve um grupo encontrado que se associa à emissão em raios-X, mesmo que esta seja conturbada e em estado de pós-fusão. Não identificamos nos nossos dados a galáxia próxima ao pico de emissão de A2428, talvez pelo fato dos nossos dados do SDSS só conterem galáxias com z_{spec} disponível. O código identificou um grupo associado à emissão de A2428. As figuras 4.11 à 4.21 apresentam os resultados de nossa comparação entre o óptico e o raio-X. As imagens de A1035, A1299, A1750, A2399 e A2428 são imagens combinadas das três câmeras EPIC do XMM-Newton com a tarefa *merge*. A imagem corrigida pelo mapa de exposição de ZwCl 1215 na figura 4.16 foi gerada com o comando *fluximaqe* do CIAO. A imagem de A1377 obtida com Acis-S não está corrigida pelo mapa de exposição. As imagens do ROSAT também não foram corrigidas são apresentadas apenas para ilustrar a distribuição do gás e do óptico.



Figura 4.11: Os círculos abertos azuis estão associadas à emissão sul de A1035A. Os quadrados abertos verdes estão associados à emissão norte de A1035B. O círculo e quadrado abertos e em ciano representam as galáxias associadas ao pico de emissão do raio-X.



Figura 4.12: Os quadrados abertos verdes e os círculos abertos azuis representam os dois modos de velocidade encontrados pelo *mclust* para A1291. A seta vermelha aponta para galáxia próxima ao pico da emissão em raios-X.



Figura 4.13: O *mclust* encontrou quatro grupos na análise 3D desse aglomerado, sendo as cruzes azuis associadas a A1750C e os círculos abertos brancos associados a A1750N. A cruz e o círculo aberto em vermelho representam as duas galáxias próximas aos picos em raios-X desses aglomerados.



Figura 4.14: A imagem mostra a emissão do gás de Abell 1377 capturada com um dos detectores ACIS-S do Chandra. O grupo de círculos abertos rosa é o que está associado à emissão em raios-X.



Figura 4.15: Imagem do ROSAT para ilustrar a associação do óptico com a distribuição do ICM de A2067. As diferentes cores representam cada um dos grupos encontrados pelo mclust.



Figura 4.16: Os quadrados abertos verdes representam o aglomerado encontrado mais ao sul de NSCS J121723+040720, ZwCl 1215. A região vermelha mostra a galáxia próxima ao pico de luminosidade em raios-X.



Figura 4.17: Figura com a região inteira de ZwCl 1215.



RA

Figura 4.18: As setas vermelhas apontam para as galáxias próximas aos dois picos de luminosidade em raios-X. O grupo de círculos abertos rosa aparece associado a distribuição do ICM de A2399.



Figura 4.19: Figura com a região inteira de A2399.



Figura 4.20: O grupo de círculos abertos azuis aparece associado com a distribuição do gás de A2428. A galáxia próxima ao pico de luminosidade do gás não aparece em nossos dados.



Figura 4.21: Figura com a região inteira de A2428.

5 Conclusão.

A partir de uma amostra de aglomerados de galáxias candidatos à interação fizemos uma análise baseada em mistura de gaussianas em busca de evidências de interação e multimodalidade. Para tal fizemos uso do pacote mclust da linguagem de programação R. A análise do mclust foi aplicada nas coordenadas e velocidade das galáxias. Os grupos isolados em três dimensões tiveram os centroides calculados. Calculamos a massa dos modos isolados em A1035 (A1035A e A1035B) e A1291 (A1291A e A1291B), no apêndice B.

Nós também obtivemos dados públicos do Chandra e do XMM-Newton para os aglomerados da nossa amostra. Obtivemos as imagens normalizadas pelo mapa de exposição para os aglomerados com dados no Chandra. Extraímos o espectro de A1377, mas não obtivemos um bom ajuste. Extraímos também o de ZwCl 1215, obtendo temperatura e metalicidade de acordo com valores encontrados na literatura. Para o XMM-Newton obtivemos as imagens combinadas das três câmeras EPIC. Geramos os perfis de temperatura e metalicidade para os aglomerados com dados no XMM-Newton com exceção de A1291 que não possui observação suficientemente profunda. Os quatro aglomerados tiveram as temperaturas e metalicidades médias calculadas. Para os aglomerados restantes da nossa amostra obtivemos as temperaturas e metalicidades médias da literatura. Os perfil de temperatura de A1035B é isotérmico. A observação de A1035A não tem muitas contagens, o que não nos permitiu um número maior de anéis de ajuste para se investigar as variações de temperatura ao longo do aglomerado. A distribuição do gás de A1035A se mostra bastante assimétrica, o que pode indicar algum processo de fusão.

A metalicidade encontrada para A2399 (~ 0.7) tem um valor elevado quando comparado aos resultados típicos de aglomerados (0.3 Z_{\odot} - 0.5 Z_{\odot}). Em Pratt et al. (2009) [79] o valor encontrado para temperatura desse aglomerado foi de 2.46 keV, 36% mais baixo do que o nosso, 3.85 keV. Mesmo quando consideramos os erros na análise, o perfil de temperatura de A2399 não é isotérmico. Na figura 5.1 temos dois gráficos que mostram as relações L_x - T_x para os aglomerados de nossa amostra com dados no XMM-Newton. Desvios dessa relação podem indicar presença de subestruturas nos aglomerados e possíveis variações nas frações de massa de gás (a razão da massa do ICM pela massa total do aglomerado), uma vez que a luminosidade em raios-X é determinada pela massa do ICM e a temperatura é determinada pela massa total do aglomerado. Nessa imagem temos o gráfico de temperatura e luminosidade em raios-X para os quatro aglomerados que obtivemos os perfis de temperatura do XMM-Newton. Os valores em vermelho foram os valores obtidos em Lopes et al. (2009) com o uso da relação L_x - T_x . As luminosidades foram obtidas a partir de observações do satélite ROSAT. Em azul temos os valores que obtivemos das médias de temperaturas dos perfis do XMM-Newton. As retas em vermelho e em azul mostram os ajustes lineares para ambos os conjuntos de dados. Mais abaixo na figura 5.2 temos o mesmo gráfico, mas dessa vez sem incluir A2399. Analisando os dois gráficos vemos que A2399 causa uma mudança considerável na inclinação da reta ajustada para os valores da nossa amostra e que as inclinações das duas retas ficam mais próximas após a exclusão dele, indicando que o ajuste do perfil de temperatura desse aglomerado precisa ser refeito.



Figura 5.1: Gráfico de luminosidade em raios-X versus temperatura. A reta em vermelho corresponde ao modelo linear ajustado aos valores Lopes et al. (2009). A reta em azul mostra o ajuste para os valores de temperatura média obtidas pelos perfis de temperatura do XMM-Newton.



Figura 5.2: Gráfico de luminosidade versus temperatura em raios-X semelhante ao anterior, mas dessa vez excluindo A2399.

Os perfis de temperatura de A1750C e A1750N estão em conformidade com os resultados de Belsole et al. (2004) [10]. O fato desses aglomerados em fusão apresentarem uma região de aumento de temperatura em comum, faz deles bons candidatos para a investigação da influência de regiões de choque nas propriedades das galáxias, tais como taxa de formação estelar específica (sSFR).

A2428 apresentou perfil de temperatura com evidência de *cool core*. A temperatura média encontrada foi de 3.73 keV. Em Lopes et al. (2009) [58], a temperatura encontrada para esse aglomerado com a relação $L_x - T_x$ foi de 4 keV, uma diferença de apenas 6.75%. Esse aglomerado é o que possui a distribuição de gás mais relaxada da nossa amostra.

A análise dos perfis de temperatura em conjunto com a metalicidade média, simetria da distribuição do ICM e distribuição dos grupos encontrados pela análise 3D do mclust nos dão evidências sobre o estado dinâmico dos aglomerados. Mesmo que a nossa amostra em z < 0.1 seja relativamente pequena, nós encontramos diferentes morfologias e estados dinâmicos, fato que já era esperado, pois selecionamos apenas aglomerados que já indicavam nos seus histogramas de velocidade e diagrama de espaço de fases algum sinal de multimodalidade ou subestrutura. Embora em alguns casos o *mclust* tenha encontrado muitos modos em 3D, ele não falhou em encontrar grupos no óptico associados às concentrações das emissões em raios-X. Analisando as imagens de largo campo de visão do ROSAT, vemos que a maior parte dos subgrupos encontrados pelo *mclust* não tem contrapartida em raios-X. Uma explicação para isso é que essas estruturas ainda são recentes e suas densidades são baixas de modo que o ICM não teve tempo de aquecer o suficiente para começar a emitir em raios-X. Além disso, em alguns casos, a diferença entre o BIC do modelo escolhido e o BIC de um modelo com menos componentes é pequena, de modo que, talvez o número de componentes encontradas possa estar sendo superestimado. E necessário, para tais casos, refazer a análise do óptico utilizando outro método, como aglomeração hierárquica, por exemplo ou forçando o número de modos a serem encontrados. A2399 é um dos casos onde o BIC do modelo escolhido (com quatro componentes) está bem próximo do BIC de menos componentes. Devemos repetir essa análise forçando o *mclust* a encontrar 2 ou 3 modos em algum modelo que também usa aglomeração hierárquica. Outro fato interessante é de que todos os modelos que assumiam simetria esférica falharam de maneira bem acentuada no critério do BIC em 3 dimensões, o que provavelmente ocorre em sistemas fora do equilíbrio como nossa amostra. Na tabela 5.1 apresentamos os resultados do número de modos encontrados no óptico pelo mclust e em raios-X pela inspeção visual da imagem do gás, na segunda e na terceira colunas respectivamente. Todos os aglomerados mostraram mais de um modo na análise 3D do $mclust \in 75\%$ apresentaram mais de um modo em raios-X.

Aglomerados menos relaxados podem ter a determinação de suas massas prejudicadas, afetando então o cálculo dos parâmetros cosmológicos. Por esse motivo se faz importante a identificação e estudo desse tipo de aglomerado. Uma das primeiras classificações da morfologia de aglomerados é aquela fornecida por Bautz & Morgan (1970) [9], baseada na dominância de galáxias brilhantes. Eles criaram um sistema de classificação de morfologias chamado *BM type*. Esse índice varia de 1 a 3 e contém duas categorias intermediárias, 1.5 e 2.5. Quanto maior o índice BM do aglomerado mais dinamicamente jovem ele é. Aglomerados com índice BM 1 possuem simetria esférica, concentração central, e uma galáxia cD. Aglomerados com índice BM 3 tem o seu gás altamente espalhado, são bastante assimétricos e não relaxados. A tabela 5.2 apresenta os resultados para as temperaturas e metalicidades médias dos aglomerados da amostra, na segunda e na terceira coluna respectivamente. Na quarta coluna temos o índice BM dos aglomerados classificados em

Nome	Número de modos em 3D	Número de modos Raio-X
A1035	2	2
A1291	2	1
A1750	4	3
A1377	6	2
A2067	6	2
NSCS121723+040720	2	2
A2399	4	2
A2428	3	1

Tabela 5.1: Quantidade de modos em raios-X comparada com quantidade de modos obtida pela análise 3D do *mclust*.

Manolopoulou & Plionis (2016) [60]. Apenas A1750 foi classificado por Leir & Van Den Bergh (1977) [51]. ZwCl 1215 foi classificado como não relaxado por Parekh et al. (2015) [72]. A escala contém quatro níveis: relaxado forte, relaxado, não relaxado e não relaxado forte.

Nome	Tx (keV)	Z_{\odot}	Índice BM
A1035	2.54	0,60	2,5
A1291	3,96		3
A1750	4,08	0,36	2,5
A1377	1,70	0,09	3
A2067	1,44	0,18	3
ZwCl1215	6,92	0,39	Não Relaxado
A2399	3,85	0,73	3
A2428	3,44	0,48	2

Tabela 5.2: Tipo BM comparado com as temperaturas e metalicidades médias.

Com exceção de A2399, que difere em 1.25 keV (48.0%) as temperaturas obtidas por relação de escala em Lopes et al (2009) [58] não são muito diferentes das que obtivemos com ajuste do perfil de temperatura. A1035 tem temperatura 0.26 keV (9.28%) menor que em Lopes et al. (2009) [58]. Para este aglomerado não encontramos outros valores medidos através de ajuste espectral na literatura para que pudéssemos comparar. Além do mais os dados do XMM-Newton possuem melhor qualidade que os dos outros satélites pelos quais esse aglomerado foi observado, permitindo análises mais precisas. A1750 tem temperatura 0.42 keV (9.13%) inferior ao valor encontrado em Lopes et al. (2009). A2428 possui um valor 0.66 keV (16.5%) menor que o encontrado em Lopes et al. (2009) [58].

Não encontramos nenhuma relação entre o índice BM e o número de modos encontrados no óptico, No entanto seria interessante repetir a análise do óptico, considerando apenas as áreas das concentrações em raios-X como foi feito para Abell 1750 e também refazer essa classificação do índice BM já que agora temos dados com melhor resolução capazes de separar estruturas que antes não era possível.

5.1 Perspectivas

Futuramente pretendemos calcular as massas dos aglomerados com as temperaturas médias obtidas através dos perfis e comparar com as massas obtidas através da tempera-

tura derivada de $L_x - T_x$.

Pretendemos também aplicar testes de gaussianidade nos subgrupos encontrados pelo mclust para testar a eficácia do método. Para os subgrupos que a distribuição de velocidades for classificada como gaussiana, vamos calcular as massas

Vamos repetir as análises do *mclust* aplicando cortes em raios mais relevantes para emissão em raios-x. Pretendemos também reduzir as imagens e analisar os dados de A2399 e A1377, mudando a normalização padrão do *background*, na tentativa de obter valores mais adequados para as temperaturas. Nós vamos também calcular R_{500} para cada estrutura encontrada em raios-X e então obter nossa própria estimativa de L_{500} mais precisa, já que parte de dados do XMM e do Chandra ao invés do ROSAT. Vamos também calcular Tx em R_{500} .

Pretendemos gerar mapas de temperatura para procurar por regiões de choque no ICM e também buscar evidências da influência do aumento de temperatura na variação da taxa de formação estelar específica das galáxias. Uma ideia interessante seria também comparar a atuação da densidade local na taxa de formação estelar específica das galáxias em áreas onde há emissão em raios-X e em áreas onde não há emissão. Assim ter uma ideia quantitativa de quanto a densidade local perde efeito na variação da sSFR em ambientes com alta concentração de ICM. Podemos começar a fazer isso de uma forma simplificada calculando a densidade superficial projetada das galáxias da nossa amostra e plotando gráficos de densidade versus formação estelar específica para regiões onde há emissão em raios-X e comparando com o mesmo gráfico para regiões onde não há emissão em raios-X.

Outra análise possível é o perfil de brilho superficial. Podemos analisar se o brilho aumenta entre os picos de luminosidade do gás dos aglomerados que são bimodais em raio-X, para tentar identificar o estado dinâmico do aglomerado, pré ou pós merger.

Para confirmar interações entre aglomerados se faz necessário aplicar modelo dinâmico para determinar se os sistemas estão gravitacionalmente ligados e determinar seus estados dinâmicos. Com tais modelos também é possível prever em quanto tempo aglomerados com A1750N e A1750C irão se fundir. Pretendemos aplicar o modelo utilizado em Nascimento et al. (2016) [69] para alguns dos sistemas da nossa amostra. A Regiões utilizadas para extrair o *background* e produzir os perfis.



Figura A.1: Regiões anulares utilizadas para extrair o *background*, de A1035, das câmeras MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares verdes são as fontes excluídas.



Figura A.2: Regiões anulares utilizadas para extrair o *background*, de A1291, das câmeras MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares pretas são as fontes excluídas.



Figura A.3: Regiões anulares utilizadas para extrair o *background*, de A1750, das câmeras MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares pretas são as fontes excluídas.



Figura A.4: Regiões anulares utilizadas para extrair o *background*, de A2399, das câmeras MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares verdes são as fontes excluídas.



Figura A.5: Regiões anulares utilizadas para extrair o *background*, de A2428, das câmeras MOS, em ciano e PN em azul escuro. As regiões circulares pretas são as fontes excluídas.

B Resultados para cada modo isolado em A1035 e A1291.

A1035							
MODO	RA	DEC	z_{spec}	σ_p	R_{200}	M_{200}	
	(J2000)	(J2000)		(Km/s)	(Mpc)	$(10^{14} M_{\odot})$	
1	158.046	40.163	0.068	505.785	1.274	2.510	
2	158.031	40.284	0.078	583.175	1.291	2.640	

A1291							
MODO	RA	DEC	z_{spec}	σ_p	R_{200}	M_{200}	
	(J2000)	(J2000)		(Km/s)	(Mpc)	$(10^{14} M_{\odot})$	
1	173.126	55.975	0.051	382.954	1.221	2.178	
2	173.046	56.015	0.057	412.928	1.283	2.542	

Referências

- B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R. X. Adhikari, V. B. Adya, and et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. ApJ, 848:L12, October 2017.
- [2] G. O. Abell. The Distribution of Rich Clusters of Galaxies. ApJS, 3:211, May 1958.
- [3] S. W. Allen and A. C. Fabian. The relationship between cooling flows and metallicity measurements for X-ray-luminous clusters. MNRAS, 297:L63–L68, July 1998.
- [4] K. A. Arnaud. XSPEC: The First Ten Years. In G. H. Jacoby and J. Barnes, editors, Astronomical Data Analysis Software and Systems V, volume 101 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, page 17, 1996.
- [5] M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott. The Chemical Composition of the Sun. ARA&A, 47:481–522, September 2009.
- [6] N. A. Bahcall. X-ray clusters of galaxies Correlations with optical morphology and galaxy density. ApJ, 217:L77–L82, October 1977.
- [7] F. W. Baier. Secondary maxima in the radial galaxy distribution of clusters of galaxies and subclustering. Astronomische Nachrichten, 304:211–220, 1983.
- [8] R. Barrena, M. Girardi, W. Boschin, and F. Mardirossian. Environmental effects on the bright end of the galaxy luminosity function in galaxy clusters. A&A, 540:A90, April 2012.
- [9] L. P. Bautz and W. W. Morgan. On the Classification of the Forms of Clusters of Galaxies. ApJ, 162:L149, December 1970.
- [10] E. Belsole, G. W. Pratt, J.-L. Sauvageot, and H. Bourdin. An XMM-Newton observation of the dynamically active binary cluster A1750. A&A, 415:821–838, March 2004.
- [11] C. M. Bird. Substructure in clusters and central galaxy peculiar velocities. AJ, 107:1637–1648, May 1994.
- [12] A. Biviano, P. Katgert, T. Thomas, and C. Adami. The ESO Nearby Abell Cluster Survey. XI. Segregation of cluster galaxies and subclustering. A&A, 387:8–25, May 2002.
- [13] A. Biviano, G. Murante, S. Borgani, A. Diaferio, K. Dolag, and M. Girardi. On the efficiency and reliability of cluster mass estimates based on member galaxies. A&A, 456:23–36, September 2006.
- [14] G. Boella, R. C. Butler, G. C. Perola, L. Piro, L. Scarsi, and J. A. M. Bleeker. BeppoSAX, the wide band mission for X-ray astronomy. A&AS, 122:299–307, April 1997.
- [15] H. Böhringer, G. W. Pratt, M. Arnaud, S. Borgani, J. H. Croston, T. J. Ponman, S. Ameglio, R. F. Temple, and K. Dolag. Substructure of the galaxy clusters in the REXCESS sample: observed statistics and comparison to numerical simulations. A&A, 514:A32, May 2010.

- [16] J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. M. White, C. Tremonti, G. Kauffmann, T. Heckman, and J. Brinkmann. The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe. MNRAS, 351:1151–1179, July 2004.
- [17] E. Bulbul, M. Markevitch, A. Foster, E. Miller, M. Bautz, M. Loewenstein, S. W. Randall, and R. K. Smith. Searching for the 3.5 keV Line in the Stacked Suzaku Observations of Galaxy Clusters. ApJ, 831:55, November 2016.
- [18] G. E. Bulbul, R. K. Smith, A. Foster, J. Cottam, M. Loewenstein, R. Mushotzky, and R. Shafer. High-resolution XMM-Newton Spectroscopy of the Cooling Flow Cluster A3112. ApJ, 747:32, March 2012.
- [19] L. L. Cowie, M. Henriksen, and R. Mushotzky. Are the virial masses of clusters smaller than we think? ApJ, 317:593–600, June 1987.
- [20] S. M. Crawford, G. D. Wirth, and M. A. Bershady. Spatial and Kinematic Distributions of Transition Populations in Intermediate Redshift Galaxy Clusters. ApJ, 786:30, May 2014.
- [21] S. De Grandi, S. Ettori, M. Longhetti, and S. Molendi. On the iron content in rich nearby clusters of galaxies. A&A, 419:7–18, May 2004.
- [22] S. De Grandi and S. Molendi. Temperature Profiles of Nearby Clusters of Galaxies. ApJ, 567:163–177, March 2002.
- [23] S. G. Djorgovski, R. R. Carvalho, R. R. Gal, S. C. Odewahn, A. A. Mahabal, R. Brunner, P. A. A. Lopes, and J. L. Kohl Moreira. The digital Palomar observatory sky survey (DPOSS): general description and the public data release. *Bulletin of* the Astronomical Society of Brazil, 23:197–197, August 2003.
- [24] R. H. Donnelly, W. Forman, C. Jones, H. Quintana, A. Ramirez, E. Churazov, and M. Gilfanov. Merging Binary Clusters. ApJ, 562:254–265, November 2001.
- [25] A. Dressler. Galaxy morphology in rich clusters Implications for the formation and evolution of galaxies. ApJ, 236:351–365, March 1980.
- [26] D. Eckert, S. Molendi, and S. Paltani. The cool-core bias in X-ray galaxy cluster samples. I. Method and application to HIFLUGCS. A&A, 526:A79, February 2011.
- [27] M. Einasto, E. Tago, E. Saar, P. Nurmi, I. Enkvist, P. Einasto, P. Heinämäki, L. J. Liivamägi, E. Tempel, J. Einasto, V. J. Martínez, J. Vennik, and P. Pihajoki. The Sloan great wall. Rich clusters. A&A, 522:A92, November 2010.
- [28] M. Einasto, J. Vennik, P. Nurmi, E. Tempel, A. Ahvensalmi, E. Tago, L. J. Liivamägi, E. Saar, P. Heinämäki, J. Einasto, and V. J. Martínez. Multimodality in galaxy clusters from SDSS DR8: substructure and velocity distribution. A&A, 540:A123, April 2012.
- [29] S. Ettori, A. Donnarumma, E. Pointecouteau, T. H. Reiprich, S. Giodini, L. Lovisari, and R. W. Schmidt. Mass Profiles of Galaxy Clusters from X-ray Analysis. Space Sci. Rev., 177:119–154, August 2013.
- [30] A. C. Fabian. Cooling Flows in Clusters of Galaxies. ARA&A, 32:277–318, 1994.
- [31] L. M. R. Fogarty, N. Scott, M. S. Owers, S. M. Croom, K. Bekki, R. C. W. Houghton, J. van de Sande, F. D'Eugenio, G. N. Cecil, M. M. Colless, J. Bland-Hawthorn, S. Brough, L. Cortese, R. L. Davies, D. H. Jones, M. Pracy, J. T. Allen, J. J. Bryant, M. Goodwin, A. W. Green, I. S. Konstantopoulos, J. S. Lawrence, N. P. F. Lorente, S. Richards, and R. G. Sharp. The SAMI Pilot Survey: stellar kinematics of galaxies in Abell 85, 168 and 2399. MNRAS, 454:2050–2066, December 2015.
- [32] S. Folkes, S. Ronen, I. Price, O. Lahav, M. Colless, S. Maddox, K. Deeley, K. Glazebrook, J. Bland-Hawthorn, R. Cannon, S. Cole, C. Collins, W. Couch, S. P. Driver, G. Dalton, G. Efstathiou, R. S. Ellis, C. S. Frenk, N. Kaiser, I. Lewis, S. Lumsden, J. Peacock, B. A. Peterson, W. Sutherland, and K. Taylor. The 2dF Galaxy Redshift Survey: spectral types and luminosity functions. MNRAS, 308:459–472, September 1999.
- [33] W. Forman, J. Bechtold, W. Blair, R. Giacconi, L. van Speybroeck, and C. Jones. Einstein imaging observations of clusters with a bimodal mass distribution. ApJ, 243:L133–L136, February 1981.
- [34] T. M. Girard, I. Platais, V. Kozhurina-Platais, W. F. van Altena, and C. E. López. The Southern Proper Motion Program. I - Magnitude equation correction. AJ, 115:855, February 1998.
- [35] L. Grego, J. E. Carlstrom, E. D. Reese, G. P. Holder, W. L. Holzapfel, M. K. Joy, J. J. Mohr, and S. Patel. Galaxy Cluster Gas Mass Fractions from Sunyaev-Zeldovich Effect Measurements: Constraints on Ω_M . ApJ, 552:2–14, May 2001.
- [36] J. E. Gunn and J. R. Gott, III. On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution. ApJ, 176:1, August 1972.
- [37] C. P. Haines, M. J. Pereira, A. J. R. Sanderson, G. P. Smith, E. Egami, A. Babul, A. C. Edge, A. Finoguenov, S. M. Moran, and N. Okabe. LoCuSS: A Dynamical Analysis of X-Ray Active Galactic Nuclei in Local Clusters. ApJ, 754:97, August 2012.
- [38] J. D. Hernández-Fernández, C. P. Haines, A. Diaferio, J. Iglesias-Páramo, C. Mendes de Oliveira, and J. M. Vilchez. Star formation activity and gas stripping in the Cluster Projected Phase-Space (CPPS). MNRAS, 438:2186–2200, March 2014.
- [39] H. Hoekstra, M. Bartelmann, H. Dahle, H. Israel, M. Limousin, and M. Meneghetti. Masses of Galaxy Clusters from Gravitational Lensing. Space Sci. Rev., 177:75–118, August 2013.
- [40] A. S. Hoffer, M. Donahue, A. Hicks, and R. S. Barthelemy. Infrared and Ultraviolet Star Formation in Brightest Cluster Galaxies in the ACCEPT Sample. ApJS, 199:23, March 2012.
- [41] R. C. W. Houghton. Revisiting the original morphology-density relation. MNRAS, 451:3427–3436, August 2015.
- [42] J. P. Huchra and M. J. Geller. Groups of galaxies. I Nearby groups. ApJ, 257:423– 437, June 1982.

- [43] G. James, D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R. Springer Texts in Statistics. Springer New York, 2014.
- [44] J. S. Kaastra and R. Mewe. X-ray emission from thin plasmas. I Multiple Auger ionisation and fluorescence processes for Be to Zn. A&AS, 97:443–482, January 1993.
- [45] P. M. W. Kalberla and U. Haud. GASS: The Parkes Galactic All-Sky Survey. Update: improved correction for instrumental effects and new data release. A&A, 578:A78, June 2015.
- [46] A. I. Kopylov and F. G. Kopylova. The structure of clusters with bimodal distributions of galaxy radial velocities. II: A1775. Astrophysical Bulletin, 64:207–216, July 2009.
- [47] M. A. Kuhn and E. D. Feigelson. Mixture Models in Astronomy. ArXiv e-prints, November 2017.
- [48] T. F. Laganá, L. Lovisari, L. Martins, G. A. Lanfranchi, H. V. Capelato, and G. Schellenberger. A metal-rich elongated structure in the core of the group NGC 4325. A&A, 573:A66, January 2015.
- [49] K. Lakhchaura and K. P. Singh. Dynamics of 10 Clusters of Galaxies with Substructures. AJ, 147:156, June 2014.
- [50] A. Leccardi and S. Molendi. Radial metallicity profiles for a large sample of galaxy clusters observed with XMM-Newton. A&A, 487:461–466, August 2008.
- [51] A. A. Leir and S. van den Bergh. A Study of 1889 Rich Clusters of Galaxies. ApJS, 34:381–403, July 1977.
- [52] Y. Li, G. L. Bryan, M. Ruszkowski, G. M. Voit, B. W. O'Shea, and M. Donahue. Cooling, AGN Feedback, and Star Formation in Simulated Cool-core Galaxy Clusters. ApJ, 811:73, October 2015.
- [53] D. A. Liedahl, A. L. Osterheld, and W. H. Goldstein. New calculations of Fe L-shell X-ray spectra in high-temperature plasmas. ApJ, 438:L115–L118, January 1995.
- [54] P. A. A. Lopes. Intermediate Redshift Galaxy Clusters from DPOSS. PhD thesis, Observatório Nacional Rua General José Cristino, 77, Rio de Janeiro, RJ 20921-400, Brazil, 2003.
- [55] P. A. A. Lopes. Empirical photometric redshifts of luminous red galaxies and clusters in the Sloan Digital Sky Survey. MNRAS, 380:1608–1620, October 2007.
- [56] P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, H. V. Capelato, R. R. Gal, S. G. Djorgovski, R. J. Brunner, S. C. Odewahn, and A. A. Mahabal. X-Ray Galaxy Clusters in NoSOCS: Substructure and the Correlation of Optical and X-Ray Properties. ApJ, 648:209–229, September 2006.

- [57] P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, R. R. Gal, S. G. Djorgovski, S. C. Odewahn, A. A. Mahabal, and R. J. Brunner. The Northern Sky Optical Cluster Survey. IV. An Intermediate-Redshift Galaxy Cluster Catalog and the Comparison of Two Detection Algorithms. AJ, 128:1017–1045, September 2004.
- [58] P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, J. L. Kohl-Moreira, and C. Jones. NoSOCS in SDSS - I. Sample definition and comparison of mass estimates. MNRAS, 392:135– 152, January 2009.
- [59] P. A. A. Lopes, A. L. B. Ribeiro, and S. B. Rembold. NoSOCS in SDSS IV. The role of environment beyond the extent of galaxy clusters. MNRAS, 437:2430–2447, January 2014.
- [60] M. Manolopoulou and M. Plionis. Galaxy cluster's rotation. MNRAS, 465:2616– 2633, March 2017.
- [61] A. B. Mantz, S. W. Allen, R. G. Morris, A. Simionescu, O. Urban, N. Werner, and I. Zhuravleva. The metallicity of the intracluster medium over cosmic time: further evidence for early enrichment. MNRAS, 472:2877–2888, December 2017.
- [62] F. Marini, S. Bardelli, E. Zucca, S. De Grandi, A. Cappi, S. Ettori, L. Moscardini, G. Tormen, and A. Diaferio. BeppoSAX temperature maps of galaxy clusters in the Corona Borealis supercluster: A2061, A2067 and A2124. MNRAS, 353:1219–1230, October 2004.
- [63] J.-C. Mauduit and G. A. Mamon. Suppressed radio emission in supercluster galaxies: enhanced ram pressure in merging clusters? A&A, 475:169–185, November 2007.
- [64] J. C. Mihos, I. R. Walker, L. Hernquist, C. Mendes de Oliveira, and M. Bolte. A Merger Origin for X Structures in S0 Galaxies. ApJ, 447:L87, July 1995.
- [65] J. J. Mohr, D. G. Fabricant, and M. J. Geller. An X-ray method for detecting substructure in galaxy clusters - Application to Perseus, A2256, Centaurus, Coma, and Sersic 40/6. ApJ, 413:492–505, August 1993.
- [66] B. Moore, N. Katz, G. Lake, A. Dressler, and A. Oemler. Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies. Nature, 379:613–616, February 1996.
- [67] R. Mushotzky. X-ray spectra of clusters and groups. In H. U. Zimmermann, J. Trümper, and H. Yorke, editors, *Roentgenstrahlung from the Universe*, pages 545–551, February 1996.
- [68] A. Muzzin, R. F. J. van der Burg, S. L. McGee, M. Balogh, M. Franx, H. Hoekstra, M. J. Hudson, A. Noble, D. S. Taranu, T. Webb, G. Wilson, and H. K. C. Yee. The Phase Space and Stellar Populations of Cluster Galaxies at z ~ 1: Simultaneous Constraints on the Location and Timescale of Satellite Quenching. ApJ, 796:65, November 2014.
- [69] R. S. Nascimento, A. L. B. Ribeiro, M. Trevisan, E. R. Carrasco, H. Plana, and R. Dupke. Dynamical analysis of the cluster pair: A3407 + A3408. MNRAS, 460:2193–2206, August 2016.

- [70] D. M. Neumann. Tracing the X-ray emitting intra-cluster medium of clusters of galaxies beyond r₂₀₀. A&A, 439:465–477, August 2005.
- [71] P. Nurmi, P. Heinämäki, T. Sepp, E. Tago, E. Saar, M. Gramann, M. Einasto, E. Tempel, and J. Einasto. Groups in the Millennium Simulation and in SDSS DR7. MNRAS, 436:380–394, November 2013.
- [72] V. Parekh, K. van der Heyden, C. Ferrari, G. Angus, and B. Holwerda. Morphology parameters: substructure identification in X-ray galaxy clusters. A&A, 575:A127, March 2015.
- [73] Y. Peng, R. Maiolino, and R. Cochrane. Strangulation as the primary mechanism for shutting down star formation in galaxies. Nature, 521:192–195, May 2015.
- [74] J. R. Peterson, S. M. Kahn, F. B. S. Paerels, J. S. Kaastra, T. Tamura, J. A. M. Bleeker, C. Ferrigno, and J. G. Jernigan. High-Resolution X-Ray Spectroscopic Constraints on Cooling-Flow Models for Clusters of Galaxies. ApJ, 590:207–224, June 2003.
- [75] R. Piffaretti, M. Arnaud, G. W. Pratt, E. Pointecouteau, and J.-B. Melin. The MCXC: a meta-catalogue of x-ray detected clusters of galaxies. A&A, 534:A109, October 2011.
- [76] P. Popesso, A. Biviano, H. Böhringer, and M. Romaniello. RASS-SDSS galaxy cluster survey. V. The X-ray-underluminous Abell clusters. A&A, 461:397–410, January 2007.
- [77] P. Popesso, A. Biviano, H. Böhringer, M. Romaniello, and W. Voges. RASS-SDSS galaxy cluster survey. III. Scaling relations of galaxy clusters. A&A, 433:431–445, April 2005.
- [78] D. Prasad, P. Sharma, and A. Babul. Cool Core Cycles: Cold Gas and AGN Jet Feedback in Cluster Cores. ApJ, 811:108, October 2015.
- [79] G. W. Pratt, J. H. Croston, M. Arnaud, and H. Böhringer. Galaxy cluster X-ray luminosity scaling relations from a representative local sample (REXCESS). A&A, 498:361–378, May 2009.
- [80] M. Ramella, A. Biviano, A. Pisani, J. Varela, D. Bettoni, W. J. Couch, M. D'Onofrio, A. Dressler, G. Fasano, P. Kjørgaard, M. Moles, E. Pignatelli, and B. M. Poggianti. Substructures in WINGS clusters. A&A, 470:39–51, July 2007.
- [81] A. L. B. Ribeiro, R. R. de Carvalho, M. Trevisan, H. V. Capelato, F. La Barbera, P. A. A. Lopes, and A. C. Schilling. SPIDER - IX. Classifying galaxy groups according to their velocity distribution. MNRAS, 434:784–795, September 2013.
- [82] L. Riguccini, P. Temi, A. Amblard, M. Fanelli, and F. Brighenti. Mid-IR Enhanced Galaxies in the Coma Virgo Clusters: Lenticulars with a High Star Formation Rate. ApJ, 810:138, September 2015.
- [83] K. Rines and A. Diaferio. CIRS: Cluster Infall Regions in the Sloan Digital Sky Survey. I. Infall Patterns and Mass Profiles. AJ, 132:1275–1297, September 2006.

- [84] D. R. Rowley, P. A. Thomas, and S. T. Kay. The merger history of clusters and its effect on the X-ray properties of the intracluster medium. MNRAS, 352:508–522, August 2004.
- [85] F. Ruppin, F. Mayet, G. W. Pratt, R. Adam, P. Ade, P. André, M. Arnaud, H. Aussel, I. Bartalucci, A. Beelen, A. Benoît, A. Bideaud, O. Bourrion, M. Calvo, A. Catalano, B. Comis, M. De Petris, F.-X. Désert, S. Doyle, E. F. C. Driessen, J. Goupy, C. Kramer, G. Lagache, S. Leclercq, J.-F. Lestrade, J. F. Macías-Pérez, P. Mauskopf, A. Monfardini, L. Perotto, G. Pisano, E. Pointecouteau, N. Ponthieu, V. Revéret, A. Ritacco, C. Romero, H. Roussel, K. Schuster, A. Sievers, C. Tucker, and R. Zylka. First Sunyaev-Zel'dovich mapping with the NIKA2 camera: Implication of cluster substructures for the pressure profile and mass estimate. ArXiv e-prints, December 2017.
- [86] J. S. Sanders, A. C. Fabian, S. W. Allen, R. G. Morris, J. Graham, and R. M. Johnstone. Cool X-ray emitting gas in the core of the Centaurus cluster of galaxies. MNRAS, 385:1186–1200, April 2008.
- [87] A. J. R. Sanderson, T. J. Ponman, and E. O'Sullivan. A statistically selected Chandra sample of 20 galaxy clusters - I. Temperature and cooling time profiles. MNRAS, 372:1496–1508, November 2006.
- [88] Luca Scrucca, Michael Fop, Thomas Brendan Murphy, and Adrian E. Raftery. mclust 5: clustering, classification and density estimation using Gaussian finite mixture models. *The R Journal*, 8(1):205–233, 2016.
- [89] A. L. Serra and A. Diaferio. Identification of Members in the Central and Outer Regions of Galaxy Clusters. ApJ, 768:116, May 2013.
- [90] C. M. Simpson, R. J. J. Grand, F. A. Gómez, F. Marinacci, R. Pakmor, V. Springel, D. J. R. Campbell, and C. S. Frenk. Quenching and ram pressure stripping of simulated Milky Way satellite galaxies. MNRAS, March 2018.
- [91] S Snowden, Steven L Snowden@nasa, K D Gov, , and K Kuntz. Cookbook for analysis procedures for xmm-newton epic mos observations of extended objects and the diffuse background. 43, 04 2011.
- [92] S. L. Snowden, R. Egger, M. J. Freyberg, D. McCammon, P. P. Plucinsky, W. T. Sanders, J. H. M. M. Schmitt, J. Trümper, and W. Voges. ROSAT Survey Diffuse X-Ray Background Maps. II. ApJ, 485:125–135, August 1997.
- [93] L. Strüder, U. Briel, K. Dennerl, R. Hartmann, E. Kendziorra, N. Meidinger, E. Pfeffermann, C. Reppin, B. Aschenbach, W. Bornemann, H. Bräuninger, W. Burkert, M. Elender, M. Freyberg, F. Haberl, G. Hartner, F. Heuschmann, H. Hippmann, E. Kastelic, S. Kemmer, G. Kettenring, W. Kink, N. Krause, S. Müller, A. Oppitz, W. Pietsch, M. Popp, P. Predehl, A. Read, K. H. Stephan, D. Stötter, J. Trümper, P. Holl, J. Kemmer, H. Soltau, R. Stötter, U. Weber, U. Weichert, C. von Zanthier, D. Carathanassis, G. Lutz, R. H. Richter, P. Solc, H. Böttcher, M. Kuster, R. Staubert, A. Abbey, A. Holland, M. Turner, M. Balasini, G. F. Bignami, N. La Palombara, G. Villa, W. Buttler, F. Gianini, R. Lainé, D. Lumb, and P. Dhez. The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The pn-CCD camera. A&A, 365:L18–L26, January 2001.

- [94] E. L. Turner and J. R. Gott, III. Groups of Galaxies. II. The Luminosity Function. ApJ, 209:6–11, October 1976.
- [95] M. J. L. Turner, A. Abbey, M. Arnaud, M. Balasini, M. Barbera, E. Belsole, P. J. Bennie, J. P. Bernard, G. F. Bignami, M. Boer, U. Briel, I. Butler, C. Cara, C. Chabaud, R. Cole, A. Collura, M. Conte, A. Cros, M. Denby, P. Dhez, G. Di Coco, J. Dowson, P. Ferrando, S. Ghizzardi, F. Gianotti, C. V. Goodall, L. Gretton, R. G. Griffiths, O. Hainaut, J. F. Hochedez, A. D. Holland, E. Jourdain, E. Kendziorra, A. Lagostina, R. Laine, N. La Palombara, M. Lortholary, D. Lumb, P. Marty, S. Molendi, C. Pigot, E. Poindron, K. A. Pounds, J. N. Reeves, C. Reppin, R. Rothenflug, P. Salvetat, J. L. Sauvageot, D. Schmitt, S. Sembay, A. D. T. Short, J. Spragg, J. Stephen, L. Strüder, A. Tiengo, M. Trifoglio, J. Trümper, S. Vercellone, L. Vigroux, G. Villa, M. J. Ward, S. Whitehead, and E. Zonca. The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The MOS cameras : The MOS cameras. A&A, 365:L27–L35, January 2001.
- [96] J. A. Tyson, F. Valdes, and R. A. Wenk. Detection of systematic gravitational lens galaxy image alignments - Mapping dark matter in galaxy clusters. ApJ, 349:L1–L4, January 1990.
- [97] R. J. van Weeren, M. Brüggen, H. J. A. Röttgering, M. Hoeft, S. E. Nuza, and H. T. Intema. Radio continuum observations of new radio halos and relics from the NVSS and WENSS surveys. Relic orientations, cluster X-ray luminosity, and redshift distributions. A&A, 533:A35, September 2011.
- [98] G. M. Voit. Tracing cosmic evolution with clusters of galaxies. Reviews of Modern Physics, 77:207–258, April 2005.
- [99] D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, J. A. Bakken, R. Barkhouser, S. Bastian, E. Berman, W. N. Boroski, S. Bracker, C. Briegel, J. W. Briggs, J. Brinkmann, R. Brunner, S. Burles, L. Carey, M. A. Carr, F. J. Castander, B. Chen, P. L. Colestock, A. J. Connolly, J. H. Crocker, I. Csabai, P. C. Czarapata, J. E. Davis, M. Doi, T. Dombeck, D. Eisenstein, N. Ellman, B. R. Elms, M. L. Evans, X. Fan, G. R. Federwitz, L. Fiscelli, S. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, B. Gillespie, J. E. Gunn, V. K. Gurbani, E. de Haas, M. Haldeman, F. H. Harris, J. Haves, T. M. Heckman, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, S. Holm, D. J. Holmgren, C.-h. Huang, C. Hull, D. Husby, S.-I. Ichikawa, T. Ichikawa, Z. Ivezić, S. Kent, R. S. J. Kim, E. Kinney, M. Klaene, A. N. Kleinman, S. Kleinman, G. R. Knapp, J. Korienek, R. G. Kron, P. Z. Kunszt, D. Q. Lamb, B. Lee, R. F. Leger, S. Limmongkol, C. Lindenmeyer, D. C. Long, C. Loomis, J. Loveday, R. Lucinio, R. H. Lupton, B. MacKinnon, E. J. Mannery, P. M. Mantsch, B. Margon, P. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, A. Merelli, D. G. Monet, J. A. Munn, V. K. Narayanan, T. Nash, E. Neilsen, R. Neswold, H. J. Newberg, R. C. Nichol, T. Nicinski, M. Nonino, N. Okada, S. Okamura, J. P. Ostriker, R. Owen, A. G. Pauls, J. Peoples, R. L. Peterson, D. Petravick, J. R. Pier, A. Pope, R. Pordes, A. Prosapio, R. Rechenmacher, T. R. Quinn, G. T. Richards, M. W. Richmond, C. H. Rivetta, C. M. Rockosi, K. Ruthmansdorfer, D. Sandford, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, M. Sekiguchi, G. Sergey, K. Shimasaku, W. A. Siegmund, S. Smee, J. A. Smith, S. Snedden, R. Stone, C. Stoughton, M. A. Strauss, C. Stubbs, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, G. P. Szokoly, A. R. Thakar, C. Tremonti,

D. L. Tucker, A. Uomoto, D. Vanden Berk, M. S. Vogeley, P. Waddell, S.-i. Wang, M. Watanabe, D. H. Weinberg, B. Yanny, N. Yasuda, and SDSS Collaboration. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. AJ, 120:1579–1587, September 2000.

[100] F. Zwicky. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. Helvetica Physica Acta, 6:110–127, 1933.