



Observatório
Nacional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DO ESTÁGIO DINÂMICO DE ABELL 3571 POR MEIO DE
ESPECTROSCOPIA ESPACIALMENTE RESOLVIDA EM RAIOS X

PATRICK PRADO DOS SANTOS

RIO DE JANEIRO

2024

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Observatório Nacional
Programa de Pós-Graduação

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE DO ESTÁGIO DINÂMICO DE ABELL 3571 POR MEIO DE
ESPECTROSCOPIA ESPACIALMENTE RESOLVIDA EM RAIOS X

por

Patrick Prado dos Santos

Dissertação submetida ao Corpo Docente do
Programa de Pós-graduação em Astronomia
do Observatório Nacional, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Grau
de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. Renato de Alencar Dupke

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Setembro de 2024

P837

Prado dos Santos, Patrick

Análise do Estágio Dinâmico de Abell 3571 por Meio de Espectroscopia Espacialmente Resolvida em Raios X [Rio de Janeiro] 2024.

xxii, 66 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Dissertação (mestrado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2024.

1. Aglomerado de galáxias. 2. Estágio dinâmico. 3. Raios X. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“ANÁLISE DO ESTÁGIO DINÂMICO DE ABELL 3571 POR MEIO DE
ESPECTROSCOPIA ESPACIALMENTE RESOLVIDA EM RAIOS X”

PATRICK PRADO DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

Dr. Renato de Alencar Dupke – Observatório Nacional
(Orientador)

Dr. Rogério Monteiro de Oliveira – Academia
Sinica/Taiwan

Dra. Yolanda Jimenez Teja – IAA/Espanha

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
4 DE SETEMBRO DE 2024

Agradecimentos

À minha família, em especial ao meu pai, por todo o incentivo dado para que eu seguisse a carreira de astrônomo, e à minha mãe, pelo apoio, que chegou de todas as formas, durante toda minha trajetória.

Ao meu orientador, Renato Dupke, por todos os comentários, críticas e elogios que sempre me incentivaram a melhorar.

À Antonis, Ícaro, Marco Antônio, Mariane, Raquel, Vinícius Bessa e Vinícius Sanches pela amizade e bons momentos proporcionados. Em especial, agradeço a Romualdo e Maria Eduarda por estarem ao meu lado desde o início do mestrado.

À Fredi, Jonatan, Marçal, Nacizo, Verónica e Wesley pelas discussões e reflexões durante o café da tarde.

Aos funcionários do Observatório Nacional pelo excelente serviço prestado, em especial, à Giane, que sempre foi muito solícita e paciente.

Agradeço, em especial, à Luiza, que me incentivou, ajudou e esteve ao meu lado, principalmente nos últimos meses do mestrado. O seu apoio foi essencial.

À CAPES e a FAPERJ pelo apoio financeiro para a execução deste trabalho.

ANÁLISE DO ESTÁGIO DINÂMICO DE ABELL 3571 POR MEIO DE
ESPECTROSCOPIA ESPACIALMENTE RESOLVIDA EM RAIOS X

RESUMO

Mapas termodinâmicos de aglomerados de galáxias criados a partir de observações em raios X são capazes de revelar estruturas presentes nestes sistemas de forma muito mais eficaz do que análises nas frequências ópticas, por exemplo. O conhecimento sobre a natureza destas estruturas favorece a correta determinação do estágio dinâmico em que o aglomerado se encontra. Neste trabalho, foi desenvolvido um código em Python capaz de criar tais mapas, desde a seleção de regiões das quais o espectro será extraído até a suavização dos pontos obtidos através do método Kriging.

O sistema teste escolhido para avaliar o código desenvolvido foi o aglomerado de galáxias Abell 3571 (A3571). Apesar de ser um aglomerado próximo ($z = 0,039$) e o sexto aglomerado mais brilhante em raios X, há poucos trabalhos desenvolvidos sobre ele e seu estágio dinâmico ainda não é claro na literatura.

Utilizando uma observação arquivada feita com o Observatório de Raios X Chandra, criamos mapas de temperatura, pressão e entropia, os quais revelaram características que não haviam sido vistas em trabalhos anteriores, como a presença de uma frente fria ao sul do núcleo do aglomerado e uma alongação de baixa entropia cuja direção não coincide com a direção de alongação de brilho em raios X.

O mapa de entropia obtido neste trabalho juntamente com mapas de trabalhos anteriores desenvolvidos com o telescópio XMM-Newton, somados à estrutura mencionada anteriormente, levaram à sugestão de um cenário onde há um grupo de galáxias colidindo com o centro de A3571.

Portanto, concluímos que o código teve êxito ao criar os mapas termodinâmicos e que estes têm papel fundamental na determinação do estágio dinâmico do aglomerado. O trabalho terá continuidade ao adaptar o código para uso com observações do XMM-Newton e aplicá-lo para este e outros sistemas.

ANALYSIS OF THE DYNAMIC STAGE OF ABELL 3571 THROUGH SPATIALLY
RESOLVED X-RAY SPECTROSCOPY

ABSTRACT

Thermodynamic maps of galaxy clusters created from X-ray observations are capable of revealing structures within these systems much more effectively than analyses in optical frequencies, for example. Understanding the nature of these structures facilitates the correct determination of the cluster's dynamical stage. In this work, a Python code was developed to create such maps, from selecting regions for spectrum extraction to smoothing the points obtained using the Kriging method.

The test system chosen to evaluate the developed code was the galaxy cluster Abell 3571 (A3571). Despite being a nearby cluster ($z = 0.039$) and the sixth brightest X-ray cluster, there are few studies on it, and its dynamical stage is still unclear in the literature.

Using an observation made with the Chandra X-ray Observatory we created temperature, pressure, and entropy maps, which revealed features not previously seen in earlier works, such as the presence of a cold front south of the cluster core and a low-entropy elongation whose direction does not coincide with the X-ray brightness elongation direction.

The entropy map obtained in this work, along with maps from previous studies using the XMM-Newton telescope and the structure mentioned above, led to the suggestion of a scenario where a group of galaxies is colliding with the center of A3571.

Therefore, we conclude that the code was successful in creating the thermodynamic maps, and these play a fundamental role in determining the dynamical stage of the cluster. The work will continue by adapting the code for use with XMM-Newton observations and applying it to this and other systems.

Lista de Figuras

- 1.1 Deslocamento de linhas espectrais em direção ao vermelho (*redshift*) devido à velocidade radial de afastamento de uma fonte. Disponível em: <https://voyages.sdss.org/preflight/light/redshift/>. 2
- 1.2 O aglomerado da bala é uma das evidências mais fortes a favor da matéria escura. A imagem de fundo foi feita com o Telescópio Espacial Hubble e com o Telescópio Magalhães, no óptico, e mostra galáxias em branco e laranja. A região rosa provém da emissão em raios X observada com o Observatório de raios X Chandra (ver seção 1.3) e a parte azul representa a matéria escura, detectada por meio de lentes gravitacionais, distorções na luz de galáxias de fundo devido à curvatura do espaço-tempo causada pela massa do aglomerado. 4
- 1.3 Comparação entre a curva de rotação esperada (azul) e a observada (verde) em uma galáxia. A contribuição de cada componente da galáxia está sinalizada na figura pelas linhas pontilhadas e tracejadas. Este fato corroborou com a existência da matéria escura. Disponível em: <https://milkyway.cs.rpi.edu/milkyway/science.php>. 6
- 1.4 Esquema representando o efeito Bremsstrahlung onde um elétron emite radiação ao ser defletado por um núcleo positivamente carregado. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung> 7
- 1.5 Imagens simuladas em raios-X do Chandra mostrando aglomerados de galáxias fictícios, elaborada por Nagai *et al.* (2007). O painel à esquerda mostra um aglomerado relaxado, enquanto o painel à direita exhibe um aglomerado perturbado, ambos em redshift $z=0$. As imagens foram construídas na faixa de energia de 0,7–2,0 keV, com pixel de tamanho $4,88 h^{-1} kpc$, resultando em $5 h^{-1} Mpc$ de lado para ambas as imagens. As elipses em vermelho representam fontes extensas que foram retiradas da análise feita pelos autores. 8

1.6	Esquema de distribuição dos CCDs do instrumento ACIS do Chandra. Os símbolos "x" e "+" indicam os focos (<i>aim points</i>) das imagens feitas com o ACIS-I e ACIS-S, respectivamente. Disponível em: https://chandra.harvard.edu/graphics/resources/illustrations/acis_schematic-300.jpg	10
1.7	Esquema dos detectores constituintes da HRC. Disponível em: https://asc.harvard.edu/cal/Hrc/fplane.png	11
1.8	Perfis radiais de brilho superficial (a) e temperatura projetada (b) para o <i>Bullet Cluster</i> . A coordenada X em (a) começa no centro de curvatura da frente de choque, enquanto que em (b) a coordenada $x = 0$ coincide com a frente de choque. A linha vermelha sólida na figura (a) representa o melhor ajuste da projeção de uma descontinuidade de densidade esférica (Markevitch e Vikhlinin, 2007). As linhas pontilhadas na figura (b) representam a “bala” (grupo de galáxias à direita na Fig. 1.2) e a frente de choque, conforme indicado na figura. Os erros representam 68% de confiança. Retirado de Markevitch e Vikhlinin (2007).	13
1.9	Frentes frias em A2142, retiradas de Markevitch <i>et al.</i> (2000). (a) regiões utilizadas para a criação do perfil de temperatura sobreposta à imagem em raios X. Nas figuras (b) a (e), os perfis a esquerda representam a frente ao sul do centro do aglomerado e os perfis a direita representam a frente ao norte. As linhas tracejadas verticais representam a posição da frente fria. Os perfis radiais de temperatura, brilho superficial e pressão podem ser vistos, respectivamente, nas figuras (b), (c) e (e). A linha vermelha na figura (d) representa o modelo que melhor se ajusta ao perfil de densidade, que está plotado como um histograma vermelho em (c). Os erros são de 90%.	14
1.10	Simulação de chacoalhamento de gás frio no núcleo do aglomerado feita por Ascasibar e Markevitch (2006), com as cores representando a temperatura. Azul é 2 keV e amarelo é $7 - 9 \text{ keV}$. Os isocontornos representam a distribuição espacial de matéria escura em escala logarítmica. As setas representam a velocidade do gás, com seu tamanho indicando o módulo da velocidade, que varia entre 30 km/s e 500 km/s . A velocidade do som para o gás quente em amarelo é $1300 - 1500 \text{ km/s}$	15
1.11	(a) mostra a imagem em raios X de A496 obtida pelo Chandra, onde as setas azuis marcam as frentes frias. Em (b) temos o mapa de temperatura elaborado com uma técnica semelhante à adotada neste trabalho. As regiões 1, 2 e 3 possuem temperatura de $3,5 \pm 0,11 \text{ keV}$, $3,08 \pm 0,07 \text{ keV}$ e $4,7 \pm 0,22 \text{ keV}$, respectivamente. As figuras foram compiladas de Dupke <i>et al.</i> (2007).	16

2.1	Imagem no óptico de A3571 composta pelos filtros g, r e z da <i>Dark Energy Camera</i> , centrada na BCG em $\alpha = 13^h 47^m 28^s .4$, $\delta = -32^\circ 51' 54'' .0$, J2000, com ~ 1 grau de lado. Norte é para cima e leste para a esquerda, assim como nas demais figuras, salvo indicação contrária.	17
2.2	Em (a), temos o campo de densidade projetada em unidades de contagens por ângulo sólido em minutos de arco quadrado, indicando a distribuição numérica de galáxias do Superaglomerado de Shapley cuja velocidade radial está entre 9000 e 18000 $km s^{-1}$. Aglomerados conhecidos com velocidade radiais entre 8500 e 18500 $km s^{-1}$ estão identificado na imagem com um x . Em (b), temos a projeção sobre AR (esquerda) e Dec (direita) da distribuição de galáxias com velocidades radiais entre 9000 e 18000 $km s^{-1}$. As imagens foram retiradas de Quintana <i>et al.</i> (2020).	19
2.3	Imagens retiradas do trabalho de Quintana e de Souza (1993). (a) mapa de densidade de galáxias com dimensão $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ até magnitude 17, com níveis de contorno de 0,06, 0,10, 0,14, 0,24, 0,31, 0,4 e 0,6 galáxias por minuto de arco quadrado. (b) plot de galáxias com dimensão $1,2^\circ \times 1,2^\circ$, onde as galáxias mais brilhantes foram desenhadas com símbolos grandes e as que tiveram suas velocidades radiais medidas foram desenhadas com símbolos preenchidos; as regiões A (nordeste), B (Sul), C e C' (central exterior e inferior, respectivamente) são mostradas por linhas pontilhadas.	20
2.4	Fontes de rádio detectadas por Venturi <i>et al.</i> (2002), onde os quadrados preenchidos representam as fontes com medida de <i>redshift</i> , os círculos preenchidos são as fontes sem a medição de <i>redshift</i> e as cruzes são as fontes de rádio sem contrapartida no óptico. Os contorno de fundo representam a densidade de galáxias com magnitude até $b_j = 19,5$ e os círculos tracejados marcam 1 Raio de Abell partindo do centro de cada um dos aglomerados. A figura está centrada em $\alpha = 13^h 49^m 10^s$, $\delta = -32^\circ 31' 47''$	21
2.5	Contornos gerados por lenteamento gravitacional fraco, onde os contornos em azul representam a distribuição de massa do aglomerado, sendo o contorno ao sudoeste e o central externo equivalentes a $S/N = 2\sigma$ e central interno equivalente a $S/N = 3\sigma$. O mapa de S/N representa a concentração de massa, onde um valor maior de S/N indica uma maior concentração de matéria. Já o contorno em vermelho representa a distribuição espacial de galáxias da sequência vermelha, indicando uma densidade de 0,024 galáxias por 100×100 pixels ($26,3'' \times 26,3''$). Esse mapa de A3571, que conta com a imagem no óptico na banda <i>r</i> invertida feita pela DECam como fundo, foi apresentado por Fu <i>et al.</i> (2024). O contorno em verde no centro do aglomerado é o mesmo das demais figuras e representa o brilho superficial dado pela observação feita com o Chandra.	23

2.6	Espectros em raios X simulados com um modelo <i>apec</i> , com abundância $0,3 Z_{\odot}$, <i>redshift</i> 0,039, normalização 10^{-4} . A temperatura atribuída em (a) foi $1,6 \text{ keV}$ e para (b) foi 10 keV	24
2.7	Mapas de razão de dureza (a) e largura equivalente (b) elaborados por Hudaverdi <i>et al.</i> (2005). As cores em (a) representam $I(1,6-10,0)\text{keV}/I(0,8-1,6)\text{keV}$ e em (b), representam os valores de largura equivalente dados pela equação 2.1. Em ambos os mapas, cada pixel tem tamanho de $15''$	25
2.8	Distribuição de temperatura (a) e abundância (b) para A3571 apresentados por Dupke (1998). Os valores obtidos através de ajustes espectrais de GIS 2 e 3 e SIS 0 e 1 simultaneamente, com 90% de confiança (Dupke, 1998).	25
2.9	Perfil radial de temperatura para o A3571 produzido por Sanderson <i>et al.</i> (2006). O erro apresentado pela área em cinza é de 1σ . As linhas pontilhadas verticais representam a região $0,1 - 0,2 r_{500}$	26
2.10	Mapas de temperatura (a), pseudo-pressão (b), pseudo-entropia (c) e metalicidade (d) elaborados por Laganá <i>et al.</i> (2019) através da observação feita pelo XMM-Newton. As unidades não foram definidas diretamente no texto.	28
3.1	Em cima: curva de luz após a execução do comando <i>deflare</i> , com os pontos de <i>flare</i> removidos representados como pontos azuis e os remanescente, em verde. O intervalo de tempo removido, que corresponde aos pontos azuis, está destacado em vermelho. Em baixo: histograma do número de contagens por segundo, sendo verde o intervalo remanescente e azul o removido, onde foi usado um valor de sigma igual a 2,5.	32
3.2	Área efetiva em função da energia em escala linear para o instrumento ACIS. A linha pontilhada se refere para o chip I3, enquanto que a sólida representa a área efetiva para o chip S3. Disponível em: https://cxc.cfa.harvard.edu/proposer/POG/html/chap6.html	34
3.3	Espectro extraído para A3571 considerando todo o chip ACIS-S3 com 30 canais por bin. A linha sólida em vermelho representa um modelo <i>phabs*apec</i> ajustado ao espectro.	34
3.4	Regiões criadas para a elaboração dos mapas. A borda para a criação das regiões está em magenta e cada um dos quadrados em verde contém 3000 contagens. Ao fundo, temos a imagem do aglomerado.	37
3.5	Ambas as figuras mostram uma interpolação entre os pontos de dados, porém na esquerda foi aplicada uma função linear e na direita uma função polinomial. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Interpolation	38
3.6	Região anular com 5000 contagens por anel utilizada para ajuste spectral e criação de perfis radiais.	41

3.7	Mapa de exposição para a observação do Chandra do A3571 (ObsId 4203) no chip S3 em unidades de [$cm^2 s$ contagens/fóton].	42
3.8	Imagem em raios X do aglomerado A3571 corrigida pela exposição do <i>chip</i> ACIS-S3.	43
4.1	Mapas de temperatura (a), pressão (b) e entropia (c) suavizados através do método Kriging, onde foi adotado 3000 contagens em cada célula. As unidades de cada um dos mapas são, respectivamente, [keV], [$keV cm^{-3}$] e [$keV cm^2$]. Os isocontornos em verde representam o brilho superficial em escala linear. No mapa de entropia, o contorno em amarelo identifica a região de baixa entropia também observada nos mapas de Hudaverdi <i>et al.</i> (2005) e Laganá <i>et al.</i> (2019).	46
4.2	Mapas de temperatura (a), pseudo-pressão (b) e pseudo-entropia (c) apresentados em Laganá <i>et al.</i> (2019) utilizando dados do XMM-Newton. Os contornos em verde são os mesmo da Fig. 4.1. A curva em verde representa uma possível frente de choque. Dado o campo de visão maior do XMM-Newton em comparação com o Chandra, foi feito um recorte no mapa original apresentado em Laganá <i>et al.</i> (2019) para melhor visualização.	47
4.3	Resultados obtidos para a frente fria ao Sul do núcleo do aglomerado. (a) imagem em raios X do aglomerado suavizada, com as regiões utilizadas na elaboração dos perfis de temperatura e pressão. O centro e o ângulo das regiões foram determinados de forma a coincidir o segundo menor arco com a forma da descontinuidade; (b) perfil radial de brilho superficial, onde pode-se ver o excesso de brilho em ~ 30 segundos de arco; (c) o perfil radial de temperatura mostra um salto significativo na região da descontinuidade, de $6,6 keV$ para $8,6 keV$; (d) no perfil radial de pressão pode-se notar seu comportamento contínuo quando comparamos a região interior e exterior à frente observada, $P \approx 0,12 keV cm^{-3}$	48
4.4	Raio que conterà 90% da energia total de uma fonte pontual observada com a câmara PN como uma função do ângulo fora do eixo em três energias.	49
4.5	Resíduo da subtração entre a emissão em raios X do aglomerado e o modelo β bidimensional ajustado em sua imagem. Em (a) temos o resíduo de todo o CCD S3 e em (b) o modelo ajustado, com $r_c = 117''$, $\beta = 0,74$, excentricidade $ellip = 0,45$ e θ definido como $\theta = 95^\circ$	50

4.6	Distribuição espacial de galáxias entre o complexo de A3571, a leste, e o complexo de A3558, a oeste. Abaixo do complexo de A3558 está o aglomerado A3560. Nas figuras (a) e (b), as cores representam a velocidade radial em km/s . Em (a) vemos uma projeção 3D no céu, onde consideramos a velocidade radial como indicador de distancia. Em (a) estão representados somente os pontos onde $9000 < v_r < 20000 km/s$, para melhor visualização. Em (b), (c) e (d) vemos projeções 2D correspondentes à uma visão frontal (Dec em função de RA, em (b), com norte para cima e leste para a esquerda), superior (v_r em função de RA, em (c), com leste para a esquerda e a profundidade aumenta para cima) e lateral (Dec em função de v_r , em (d), com norte para cima e profundidade aumenta para a direita), sendo o ponto destacado em verde a BCG de A3571.	51
4.7	Mapa de pseudo-entropia apresentado por Hudaverdi <i>et al.</i> (2005), derivado como $kTn^{-2/3}$, onde a escala de cores representam os valores de $HR \times I^{-1/3}$, sendo HR a razão de dureza calculada no trabalho original como $I(1,6 - 10,0) keV / I(0,8 - 1,6) keV$, sendo a razão das contagens nas respectivas faixas de energia. As unidades indicadas na escala não ficam claras no texto original. A elipse branca destaca a região de baixa entropia que também pode ser observada na Fig. 4.2(c). Na figura, $1' \approx 46,3 kpc$	52
5.1	Quadro do vídeo da simulação da colisão entre dois aglomerados apresentada por Vaezzadeh <i>et al.</i> (2022). Todo o quadrado tem $2,5 Mpc$ de lado e as cores representam a projeção da temperatura ponderada pela densidade ao quadrado, para melhor representar as imagens observacionais (Vaezzadeh <i>et al.</i> , 2022). No trabalho referenciado, três aglomerados relaxados colidem, sendo a seta mais interna a direção de incidência do primeiro aglomerado e a mais externa, a direção de incidência do segundo (colisão observada na figura). A primeira colisão ocorreu em um momento anterior ao início do vídeo, de forma que o aglomerado resultante após a primeira colisão já apresentava estruturas como as da Fig. 1.10 imediatamente antes da segunda colisão.	55
A.1	ICL vista com o JWST. Em (a) temos a imagem em cores fantasia gerada pelos filtros F277W, F356W e F444W do JSWT. Destacada na imagem, vemos a nuvem principal mais densa, a nuvem secundária menos densa e subestruturas como conchas à esquerda da BCG, uma parede à direita e uma sobredensidade (<i>clump</i>) na borda superior desta parede. Em (b) vemos um dos mapas de ICL gerados, onde os contornos representam a superfície de brilho da ICL e ao fundo temos a imagem original do filtro F150W do JSWT.	66

A.2 Mapas suavizados de temperatura (a), pressão (b) e entropia (c) para RXJ2129. Em todos os três mapas, os contornos verdes representam o brilho superficial em raios-X e os contornos magenta representam os erros relativos para cada parâmetro. No mapa de temperatura, os contornos delimitam as regiões dentro das quais os erros relativos são de 15%, 20%, 25%, 30% e 35%, aumentando do centro para fora. No mapa de pressão, os contornos representam erros relativos de 25%, 30%, 35% e 40%, e, no mapa de entropia, 20%, 27,5%, 35% e 42,5%.	66
---	----

Lista de Tabelas

1.1	Classificação de um aglomerado quanto a sua riqueza no catálogo de Abell.	3
1.2	Descrição dos tipos de aglomerados de acordo com a classificação de Bautz-Morgan.	3
1.3	Configurações do espelho do Observatório Chandra, retirado de Christensen e Ramsey (2022).	9

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução	1
1.1 Aglomerados de galáxias	1
1.2 Astronomia de raios X	5
1.2.1 Bremsstrahlung Térmico	6
1.2.2 Características da emissão em raios X de aglomerados de galáxias	7
1.3 Observatório em Raio X Chandra	9
1.4 Frentes frias e de choque	12
2 Abell 3571	17
2.1 Óptico e rádio	18
2.2 Raios X	22
3 Metodologia	29
3.1 Redução de dados	29
3.1.1 Arquivos de nível 1 e 2	29
3.1.2 Correção da astrometria	30
3.1.3 Remoção de fontes pontuais e erupções solares	30
3.1.4 Arquivo de <i>background</i>	31
3.1.5 Extração de espectros	32
3.2 Ajuste espectral	33
3.3 Mapas de temperatura, pressão e entropia	36
3.3.1 Código para criar as regiões	36
3.3.2 O método <i>Kriging</i>	36
3.4 Perfis radiais e cálculo da massa	38
3.5 Análise de imagens	41
3.5.1 Imagem corrigida	41
3.5.2 Ajuste do modelo- β 2D	42

4	Análises e resultados	45
4.1	Análise do estágio dinâmico	45
4.2	Cálculo de massa	51
5	Sumário e conclusões	53
5.1	Perspectivas	56
	Referências Bibliográficas	57
A	RX J2129.7+0005	65

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aglomerados de galáxias

A primeira menção à aglomerados de galáxias foi feita, mesmo que de forma breve, por Charles Messier em 1784 quando este notou uma concentração de nebulosas¹ na constelação de Virgo. Entretanto, seu objetivo não era o estudo dessas nebulosas e não foi dada a devida atenção para este fato. O primeiro estudo detalhado sobre aglomerados de galáxias foi feito por [Wolf \(1906\)](#), onde era descrito o aglomerado de Perseus, mas foi somente em 1958, quando George O. Abell publica seu catálogo de aglomerados, que o estudo desses objetos astronômicos se intensificou.

Em seu primeiro catálogo ([Abell, 1958](#)), Abell definiu quais seriam as características necessárias para que uma concentração de galáxias fosse classificada como um aglomerado e, a partir de análise de placas fotográficas do Palomar Observatory Sky Survey (POSS), foram encontrados 2712 aglomerados, dentro os quais 1682 atendem a todos os critérios adotados por ele. Esse primeiro estudo foi feito somente para o hemisfério Norte celeste, porém em 1989 o catálogo foi expandido para o hemisfério Sul ([Abell et al., 1989](#)), totalizando 4073 aglomerados.

Os critérios adotados por Abell foram basicamente três: as magnitudes das galáxias membros do aglomerado devem estar entre m_3 e $m_3 + 1$, onde m_3 é a magnitude da terceira galáxia mais brilhante; o *redshift* z do aglomerado deve estar na faixa $z \leq 0,2$ ([Abell et al., 1989](#)); e um aglomerado deve ter pelo menos 50 membros dentro de um raio de $\sim 2,1 h_{70}^{-1} Mpc$ ou $1,7/z$ minutos de arco, distância essa conhecida como raio de Abell.

O *redshift* (ou desvio para o vermelho, em português) está relacionado com o efeito Doppler sofrido pela luz emitida por um objeto quando este se afasta de nós. Esse efeito é medido pelo deslocamento das linhas espectrais da fonte, como podemos ver na Fig. 1.1. Sua definição é de acordo com a diferença entre o comprimento de onda observado λ e em repouso λ_0 da seguinte forma:

¹Até que [Hubble \(1926\)](#) diferenciasse as nebulosas galácticas das extragalácticas, galáxias tinham esta denominação.

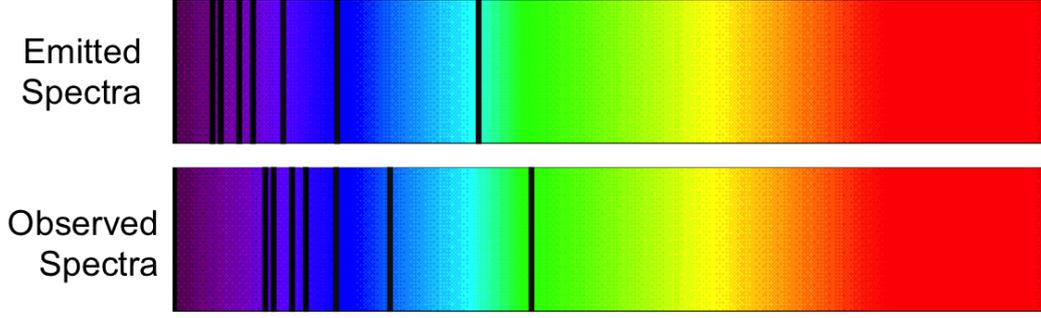


Figura 1.1: Deslocamento de linhas espectrais em direção ao vermelho (*redshift*) devido à velocidade radial de afastamento de uma fonte. Disponível em: <https://voyages.sdss.org/preflight/light/redshift/>.

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (1.1)$$

onde $\Delta\lambda$ é dado por $\lambda - \lambda_0$.

A distância determinada a partir do fluxo de objetos cuja luminosidade é conhecida, denominada por distância luminosidade D_L , é dada por

$$L = 4\pi D_L^2 f \quad (1.2)$$

onde L é a luminosidade e f , o fluxo. Esta, por sua vez, está relacionada com o *redshift* de acordo com

$$D_L = D_A(1 + z)^2 \quad (1.3)$$

onde D_A é a distância diâmetro angular, dada por

$$D_A = \frac{c}{H_0} \frac{1}{1 + z} \int_0^z \frac{du}{\sqrt{\Omega_M(1 + z)^3 + \Omega_\Lambda}} \quad (1.4)$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo, H_0 a constante de Hubble, Ω_M o parâmetro cosmológico de densidade de matéria e Ω_Λ o parâmetro cosmológico relacionado à energia escura.

Há outros catálogos de aglomerados disponíveis, como Zwicky *et al.* (1961-68), mas o de Abell é mais restrito ao identificar os aglomerados (Sarazin, 1988). Zwicky, também utilizando as placas do POSS, propôs o seguintes critérios: os limites do aglomerado eram delimitados pelo contorno onde a densidade de galáxias era o dobro da densidade do *background*; deveriam haver pelo menos 50 galáxias com magnitude entre m_1 (magnitude da galáxias mais brilhante) e $m_1 + 3$. Não foi imposto limite de distância, mas Virgo, por exemplo, não foi catalogado por se estender a várias placas, dado sua proximidade.

A principal forma de classificação utilizada por Abell era quanto a riqueza dos aglomerados. Há 6 classes de riqueza, representadas por números entre 0 e 5, que levam em conta

Classe de riqueza	Número de membros
0	30 - 49
1	50 - 79
2	80 - 129
3	130 - 199
4	200 - 299
5	mais de 299

Tabela 1.1: Classificação de um aglomerado quanto a sua riqueza no catálogo de Abell.

Tipo	Descrição	Exemplo
I	Uma única galáxia central do tipo cD dominante, que se destaca dentre as galáxias mais brilhantes do aglomerado	A2199, A3571
I-II	Intermediário	
II	Tipo intermediário entre os tipos I e III, não havendo uma única galáxia cujo brilho se destaca	Coma
II-III . . .	Intermediário	
III	Não há galáxias que se destaquem dentre as galáxias mais brilhantes do aglomerado. Pode ser subdividido, ainda, em dois subtipos: III-E e III-S, dependendo da ausência ou presença de um número considerável de galáxias espirais brilhantes, respectivamente	A1060, A2151

Tabela 1.2: Descrição dos tipos de aglomerados de acordo com a classificação de Bautz-Morgan.

o número de galáxias dentro das condições mencionadas anteriormente. A classificação de um aglomerado segue o descrito na tabela 1.1. Há outras classificações na literatura que dependem de outras características, como, por exemplo, a de Bautz-Morgan (Bautz e Morgan, 1970), onde os aglomerados são classificados de acordo com sua morfologia, seguindo o descrito na tabela 1.2.

Um ponto importante relacionado à morfologia de um aglomerado é seu estado dinâmico, isto é, se ele está sofrendo uma colisão com um grupo ou mesmo outro aglomerado de galáxias ou se está relaxado. Diz-se que um aglomerado está relaxado quando este está em equilíbrio hidrodinâmico, apresentando uma morfologia regular e simétrica, com seu núcleo mais denso, e pouca ou nenhuma subestrutura (*subclustering*), características que pode ser analisadas de forma mais clara quando se observa o gás do meio intra-aglomerado (ICM, do inglês *intracluster medium*), que tem emissão na faixa dos raios X (veja a seção 1.2).

Um aglomerado de galáxias é composto por três componentes: galáxias e luz intra-aglomerado (ICL, do inglês *intracluster light*) ($M_g \sim 3 - 4\% M_{total}$), gás intra-aglomerado

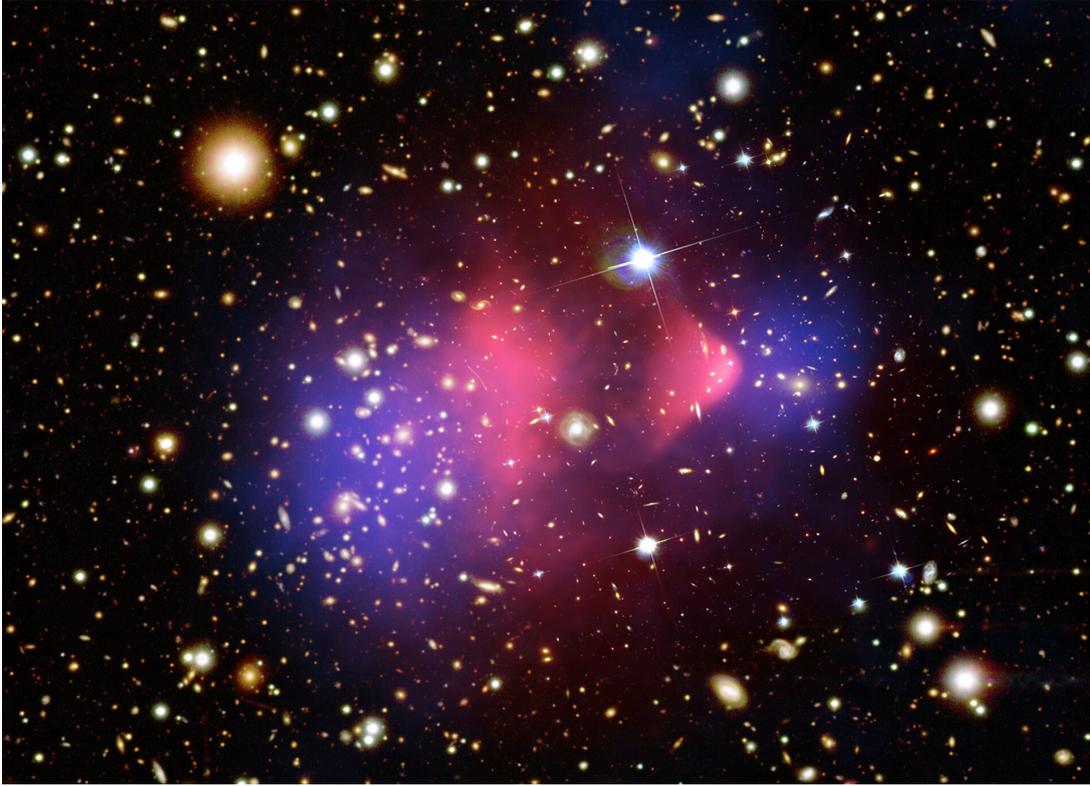


Figura 1.2: O aglomerado da bala é uma das evidências mais fortes a favor da matéria escura. A imagem de fundo foi feita com o Telescópio Espacial Hubble e com o Telescópio Magalhães, no óptico, e mostra galáxias em branco e laranja. A região rosa provém da emissão em raios X observada com o Observatório de raios X Chandra (ver seção 1.3) e a parte azul representa a matéria escura, detectada por meio de lentes gravitacionais, distorções na luz de galáxias de fundo devido à curvatura do espaço-tempo causada pela massa do aglomerado.

($M_{ICM} \sim 16\%M_{total}$) e matéria escura – matéria diferente da bariônica, ou matéria “normal”, de natureza desconhecida, que interage somente gravitacionalmente, representando a maior parte da massa do aglomerado. Cada um deles é descrito brevemente a seguir e estão representados na Fig. 1.2.

1. **Galáxias e ICL:** Compostas por estrelas, gás e poeira, elas representam a maior porção da luminosidade nas frequências ópticas do aglomerado, que contém cerca de 10^2-3 galáxias. O tipo de galáxia e sua distribuição pelo aglomerado pode indicar seu estado dinâmico, onde um aglomerado relaxado apresenta maior quantidade de galáxias elípticas, que possuem uma população estelar mais velha, são mais avermelhadas e têm uma fração de gás bem menor do que as espirais, e lenticulares, classe intermediária entre galáxias elípticas e espirais, distribuídas com simetria esférica ao redor do núcleo do aglomerado, com poucas galáxias espirais (ricas em gás e mais azuis, com alta taxa de formação estelar e população mais jovem); enquanto que, em contrapartida, um aglomerado “irregular” não apresenta nem um tipo de galáxia predominantes nem simetria em sua distribuição, embora possam haver subestru-

turas (Seward e Charles, 2010). A interação entre as galáxias do aglomerado pode arrancar as estrelas de sua galáxia de origem, fazendo com que elas não estejam ligadas gravitacionalmente a nenhuma galáxia. Essas estrelas que estão ligadas ao potencial do aglomerado, mas não ao potencial de uma galáxia em específico são o constituinte do ICL.

2. **Meio Intra-aglomerado:** O gás praticamente todo ionizado presente no meio entre as galáxias de um aglomerado representa a maior parcela da matéria bariônica do sistema. Devido a sua alta temperatura ($10^{7-8} K$) e baixa densidade ($\sim 10^{-3} cm^{-3}$) emite principalmente em raios X através do Bremsstrahlung (veja §1.2.1) e é opticamente fino, resultando na observação do raio X emitido pelo gás em toda linha de visada. O ICM será melhor descrito na seção 1.2.
3. **Matéria escura:** A maior parte da matéria que existe no Universo é matéria escura. Ela foi sugerida para explicar a velocidade de galáxias no aglomerado de Coma por Zwicky (1933), em que foi proposta a existência de uma “*dunkle materie*” necessária para manter o sistema gravitacionalmente ligado; mas só décadas depois que essa ideia começou a ser aceita pela comunidade científica, quando Rubin e Ford (1970) mostraram que a curva de rotação de galáxias não caía como o esperado nas regiões externas (Fig. 1.3). A natureza deste tipo de matéria ainda é desconhecida, sendo a Matéria Escura Fria (CDM, do inglês *Cold Dark Matter*)² o tipo de matéria mais aceito na literatura atualmente, com diversos candidatos para descrever sua natureza, como os WIMPs (*Weakly Interactive Massive Particles*), buracos negros primordiais ou mesmo teorias da gravidade modificada (Bertone e Tait, 2018).

1.2 Astronomia de raios X

A primeira detecção de raios X vindos de fontes extrassolares ocorreu em 1962 no voo de um foguete Aerobee. Por meio de contadores Geiger, um sinal de raios X moles (menos energéticos) foi detectado na direção da constelação de Escorpião, fonte que ficou conhecida como Scopus X-1 (Sco X-1) (Giacconi *et al.*, 1962). Atualmente, sabe-se que este é um sistema binário composto por uma estrela de nêutrons e uma estrela companheira, a qual doa material para a primeira, formando um disco de acreção.

Alguns anos depois, em 1966, Byram *et al.* (1966) detecta, também através de um Aerobee, emissão em raios X em M87, no aglomerado de Virgo. Em 1971, foi detectada a emissão nos aglomerados de Perseus (Fritz *et al.*, 1971; Gursky *et al.*, 1971b) e Coma

²Escura, porque não interage eletromagneticamente com a matéria bariônica, e fria, porque ela tem velocidade muito menor que a velocidade da luz. Segundo o modelo cosmológico aceito atualmente (Λ CDM), o Universo é composto por 68% de energia escura, 27% de matéria escura e somente os 5% restante seriam matéria bariônica.

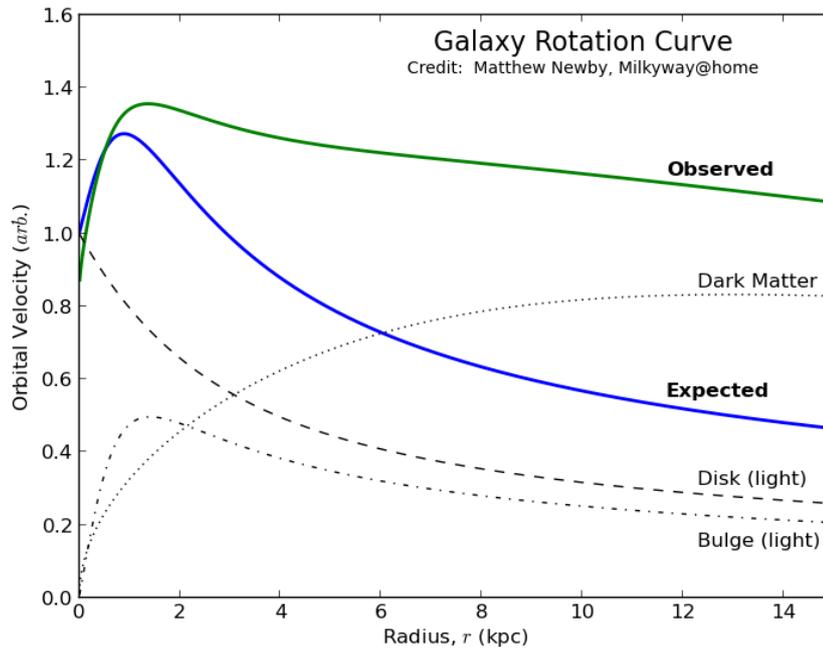


Figura 1.3: Comparação entre a curva de rotação esperada (azul) e a observada (verde) em uma galáxia. A contribuição de cada componente da galáxia está sinalizada na figura pelas linhas pontilhadas e tracejadas. Este fato corroborou com a existência da matéria escura. Disponível em: <https://milkyway.cs.rpi.edu/milkyway/science.php>.

(Gursky *et al.*, 1971a; Meekins *et al.*, 1971). Sendo esses três aglomerados próximos a nós, foi levantada a hipótese de que os aglomerados em geral emitem raios X, o que foi confirmado com o levantamento completo do céu feito pelo satélite Uhuru (Sarazin, 1988). Com a afirmação de que a emissão em raios X de aglomerados é constante no tempo (Elvis, 1976) e com a detecção da linha de ferro em Perseus por Mitchell *et al.* (1976), foi estabelecido que a emissão em raios X tem origem térmica, com uma temperatura de $\sim 10^8 K$ (Sarazin, 1988; Seward e Charles, 2010). Felten *et al.* (1966) foi o primeiro a sugerir que o Bremsstrahlung térmico fosse o mecanismo de emissão responsável pelo raios X do ICM.

1.2.1 Bremsstrahlung Térmico

Bremsstrahlung, também conhecido como emissão livre-livre ou radiação de frenagem é o processo que ocorre devido à deflexão um elétron por um íon, sem que ambos fiquem ligados após a aproximação (por isso o nome livre-livre). Ao se aproximarem, como o íon (um próton, por exemplo) tem massa muito maior que o elétron, ele não sofrerá desvio significativo, enquanto que o elétron irá sofrer uma desaceleração e, portanto, converterá energia cinética em radiação eletromagnética (por isso radiação de frenagem). Para um esquema deste mecanismo, veja a Fig. 1.4.

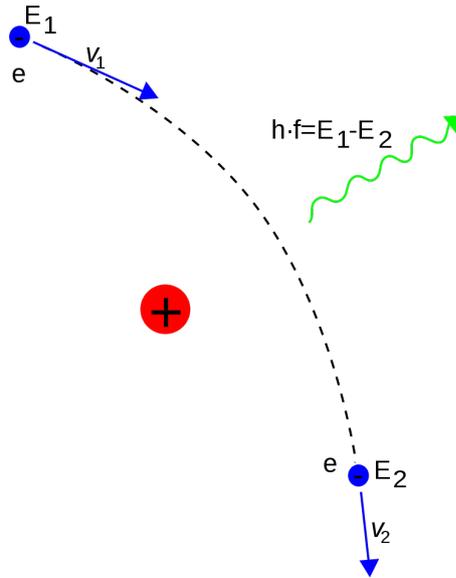


Figura 1.4: Esquema representando o efeito Bremsstrahlung onde um elétron emite radiação ao ser defletado por um núcleo positivamente carregado. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung>

A emissão térmica para todo o gás é calculada ao definir uma distribuição de velocidades maxwelliana, já que a emissão é térmica, e integrar sobre a frequência chegando à emissividade dada pela equação (Rybicki e Lightman, 2004):

$$\epsilon = 1,4 \times 10^{-27} T^{1/2} n_e n_i Z^2 \bar{g}_B(T) \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \quad (1.5)$$

onde Z é o número atômico médio, n_e e n_i são as densidades numéricas de elétrons e íons, respectivamente, e T é a temperatura do gás. O termo $\bar{g}_B(T)$ é uma média em frequência do fator de Gaunt médio em velocidade, que está na faixa de 1,1 a 1,5 e leva em conta os efeitos quânticos do espalhamento Bremsstrahlung.

Da equação 1.5, vemos que a emissão em raios X de um aglomerado depende fortemente da densidade do gás e fracamente de sua temperatura, já que:

$$\epsilon \propto n^2 T^{-1/2} \quad (1.6)$$

1.2.2 Características da emissão em raios X de aglomerados de galáxias

Quando um aglomerado de galáxias se encontra relaxado, a morfologia de seu ICM é esférica e regular, apresentando um excesso de brilho no centro (veja Fig. 1.5). Essa alta densidade no centro pode ser explicada por um modelo isotérmico para o gás, onde a distribuição radial de densidade apresenta esse pico central, como o perfil descrito pelo modelo- β (abaixo) (Sarazin, 1988).

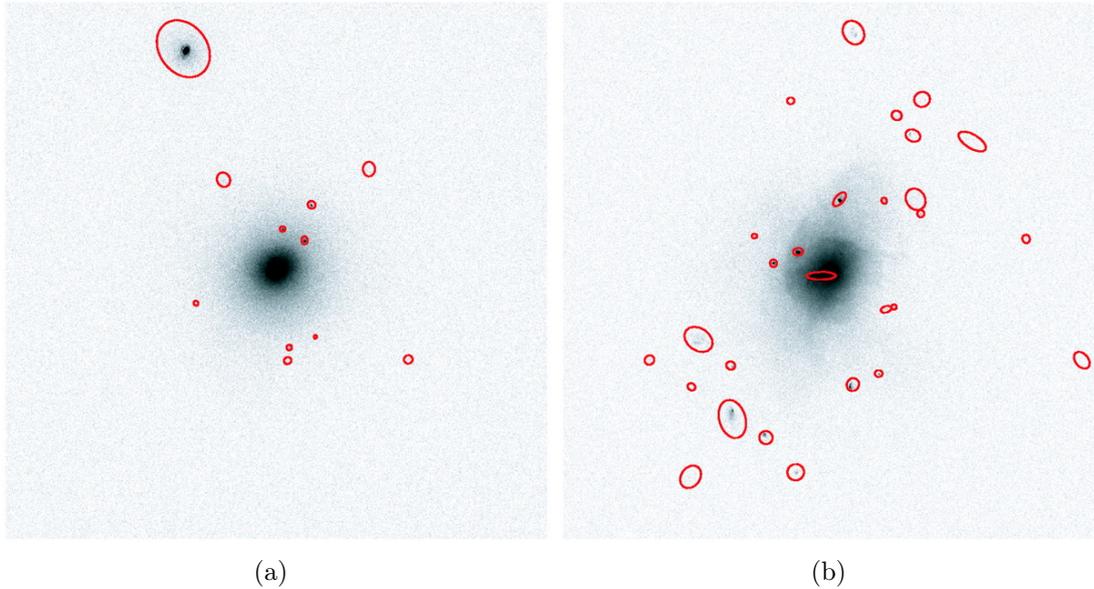


Figura 1.5: Imagens simuladas em raios-X do Chandra mostrando aglomerados de galáxias fictícios, elaborada por Nagai *et al.* (2007). O painel à esquerda mostra um aglomerado relaxado, enquanto o painel à direita exibe um aglomerado perturbado, ambos em redshift $z=0$. As imagens foram construídas na faixa de energia de 0,7–2,0 keV, com pixel de tamanho $4,88 h^{-1} kpc$, resultando em $5 h^{-1} Mpc$ de lado para ambas as imagens. As elipses em vermelho representam fontes extensas que foram retiradas da análise feita pelos autores.

$$n(r) = n_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]^{-3\beta/2} \quad (1.7)$$

Como a emissividade por Bremsstrahlung térmico é proporcional ao quadrado da densidade, regiões mais densas emitem mais raios X e, conseqüentemente, esfriam mais rapidamente. Se a taxa de resfriamento do gás for suficientemente alta, pode haver um fluxo de gás para a região central do aglomerado, fenômeno conhecido como *cooling flow* (fluxo de resfriamento, em tradução livre). Nesse mecanismo, conforme o gás se acumula no fundo do poço de potencial (centro do aglomerado), sua densidade aumenta e, conseqüentemente, sua emissão por Bremsstrahlung também se intensifica. Isso faz com que esse gás do centro esfrie e se deposite em regiões mais internas do núcleo, causando uma diferença de pressão entre essa região mais interna do centro e a região mais externa. Como resultado, o gás da parte externa é levado em direção ao centro, aumentando a densidade nesta região e intensificando todo o processo. Desta forma, com a virialização do aglomerado, deveríamos ver um núcleo com temperaturas significativamente baixas, ao ponto em que não haja mais emissão em raios X devido à temperatura do gás, que não seria elevada o suficiente no núcleo. Entretanto, isso não é observado.

Peterson *et al.* (2003) analisou uma amostra de 14 aglomerados de galáxias através do instrumento RGS do satélite XMM-Newton, espectrômetro de alta resolução ($E/\Delta E$

entre 100 e 500) que opera na faixa $0,33 - 2,5 \text{ keV}$. A distribuição de temperatura nos aglomerados foi determinada através da distribuição da emissão das linhas de Fe L, que ocorrem em $0,7 - 1,5 \text{ keV}$. De forma geral, os espectros apresentam linhas de emissão de plasmas mais frios que a temperatura ambiente do aglomerado, T_0 , até $\sim T_0/2$. Entretanto, apresentam um déficit considerável para temperaturas menores que $T_0/3$ devido a não detecção de linhas de Fe XVII-XXI em sistemas com temperaturas ambiente de $4 - 7 \text{ keV}$, por exemplo, que deveriam existir no núcleo segundo o modelo proposto para o *cooling flow*. Dentre os possíveis mecanismos para justificar a ausência de temperaturas tão baixas, Peterson e Fabian (2006) citam o aquecimento do gás devido ao AGN no núcleo do aglomerado, a condução térmica proveniente de camadas mais externas do gás e a absorção dessa emissão de um gás mais frio por materiais que circundam a BCG (essa proposta foi abordada mais detalhadamente por Fabian *et al.* (2022)), dentre outros.

1.3 Observatório em Raios X Chandra

Embora tenha sido lançado somente em julho de 1999, o projeto que deu origem ao Observatório em raios X Chandra foi proposto em 1963 à NASA, começando com voos de foguetes iniciais e culminando em um telescópio em raios X com resolução angular menor que um segundo de arco (Christensen e Ramsey, 2022). Mesmo sofrendo diversos cortes em seu orçamento, a resolução angular almejada foi alcançada e o projeto foi um sucesso, estando em funcionamento até a data de publicação deste texto. As configurações dos espelhos deste telescópio podem ser vistas na Tabela 1.3.

Os instrumentos presentes no Chandra são quatro: *Advanced CCD Imaging Spectrometer* (ACIS); *High Resolution Camera* (HRC); e dois espectrômetros que funcionam por meio de grades de difração, o *High Energy Transmission Grating Spectrometer* (HETGS) e o *Low Energy Transmission Grating Spectrometer* (LETGS). O primeiro deles, composto

Parâmetro	Valor
Número de segmentos aninhados	4
Distância focal	10 m
Diâmetros de interseção	0.63, 0.85, 0.97, 1.2 m
Ângulos de tangência	27 37 42 52 minutos de arco
Comprimento do segmento	0.85 m
Espessura da parede	16 - 24 mm
Material	Zerodur
Revestimento	Irídio, 10 nm
Área efetiva	770 cm^2 em 1 keV
Resolução angular (HEW)	0.5 segundos de arco

Tabela 1.3: Configurações do espelho do Observatório Chandra, retirado de Christensen e Ramsey (2022).

ACIS FLIGHT FOCAL PLANE

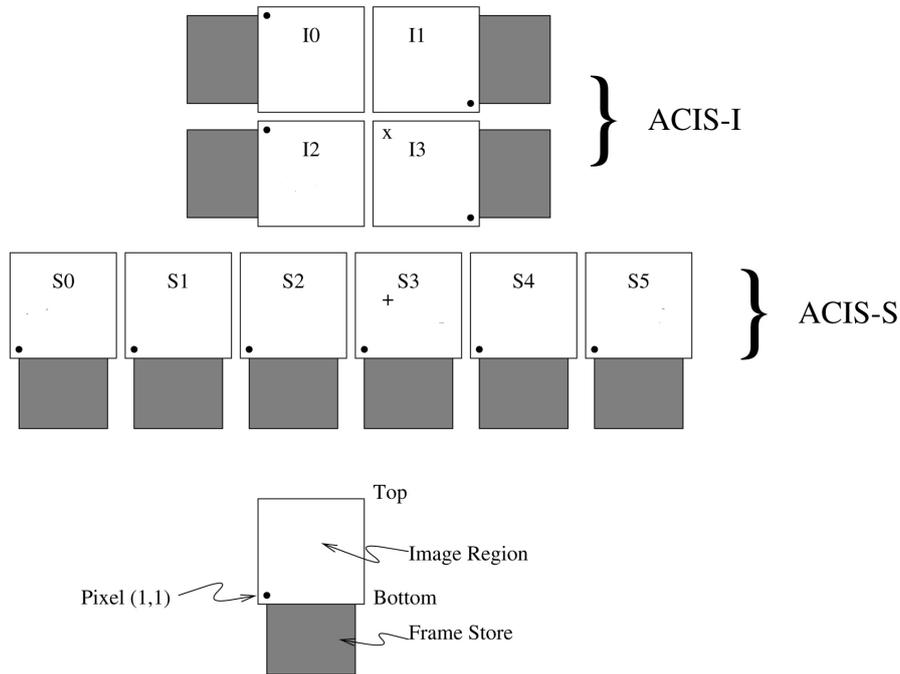


Figura 1.6: Esquema de distribuição dos CCDs do instrumento ACIS do Chandra. Os símbolos "x" e "+" indicam os focos (*aim points*) das imagens feitas com o ACIS-I e ACIS-S, respectivamente. Disponível em: https://chandra.harvard.edu/graphics/resources/illustrations/acis_schematic-300.jpg.

por um conjunto de CCDs (do inglês, *Charged Coupled Device*), é capaz de, ao mesmo tempo, capturar a imagem em raios X do objeto em foco e medir a energia de cada fóton incidente. Os dez CCDs presentes neste instrumento, todos compostos por 1024x1024 pixels, são divididos em dois grupos, quatro CCDs distribuídos numa grade 2x2 formam o ACIS-I, usado para imageamento; e os seis restantes, distribuídos linearmente, formam o ACIS-S, que pode ser usado tanto para imageamento quanto para espectroscopia com a grade de difração. Todos os CCDs tem FoV (do inglês, *field of view*) de 8.3×8.3 minutos de arco, porém há uma diferença entre as faixas de energia. A disposição dos CCDs pode ser conferida na Fig. 1.6.

Já o instrumento HRC tem um método de detecção diferente do utilizado pelo ACIS, as placas de microcanal (tradução livre de *microchannel plate*). Após passar por uma barreira contra raios ultravioleta/íons, os raios X são absorvidos por uma camada de iodeto de césio onde ocorre a emissão de elétrons por efeito fotoelétrico. Esses fotoelétrons são acelerados em direção a uma placa de microcanais, na qual a interação desses elétrons com o material da placa multiplica a quantidade de elétrons presentes, amplificando o sinal incidente. Esse sistema é composto por duas placas de microcanais e, geralmente, são produzidos 2×10^7 elétrons por fóton incidente, sendo a posição do fóton de raio X calculada através do centroide da nuvem de elétrons.

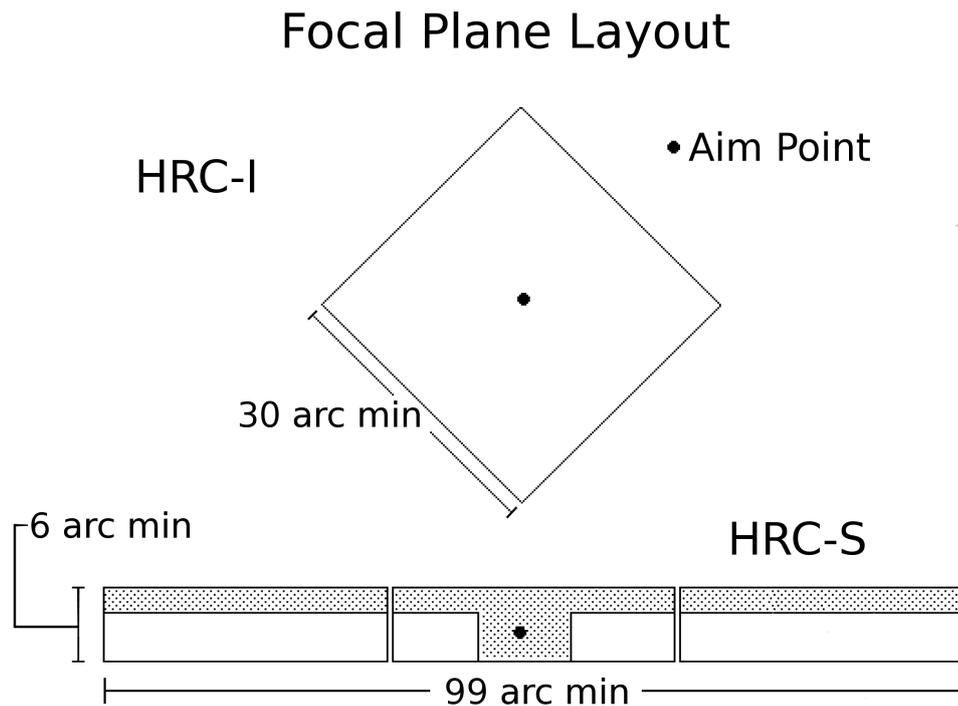


Figura 1.7: Esquema dos detectores constituintes da HRC. Disponível em: <https://asc.harvard.edu/cal/Hrc/fplane.png>.

A HRC também é dividida em dois detectores, a HRC-I, voltada para imageamento e conta com o maior FoV dos instrumentos do Chandra ($\sim 30' \times 30'$), e a HRC-S, que é utilizada como saída para a LETG e tem FoV de $6' \times 99'$. Um esquema dos detectores da HRC pode ser visto na Fig. 1.7.

O HETG é capaz de fornecer espectros de alta resolução ($E/\Delta E$ até 1000) entre 0,4 e 10,0 keV para fontes pontuais ou com alguns segundos de arco de tamanho. É composto por duas grades de difração, uma para médias energias (MEG, *Medium Energy Grating*) que intercepta os raios X vindos da borda do espelho, e uma para altas energias (HEG, *High Energy Grating*) que intercepta os raios da parte central do espelho. Como ambas as grades estão montadas em uma mesma estrutura, são usadas ao mesmo tempo. O HETG foi desenvolvido para trabalhar juntamente com o ACIS-S, mas podem ser usados outros detectores para casos particulares.

Já o LETG tem como principal detector o HRC-S, sendo capaz de fornecer espectros de alta resolução ($\lambda/\Delta\lambda > 1000$) entre 80 e 175 Å (0,07 - 0,15 keV) e espectros com resolução moderada em comprimentos de onda menores (até 1,2 Å). O ACIS-S também pode ser usado conjuntamente com o LETG, embora apresente resolução espectral menor abaixo de 0,6 keV. Acima de 0,78 keV, a combinação HETG e ACIS-S apresenta uma resolução espectral melhor que as combinações que utilizam o LETG.

1.4 Frentes frias e de choque

A resolução angular do Chandra proporcionou a observação e a distinção de estruturas menores que 1 kiloparsec (para aglomerados próximos, $z \leq 0,05$): as frentes frias e de choque (Markevitch e Vikhlinin, 2007). As frentes de choque (*shock fronts*) são ondas de pressão que se propagam através de um meio mais rápidas que a velocidade do som neste meio. Vistas como descontinuidades de densidade que ocorrem no ICM, elas representam uma mudança abrupta nas propriedades físicas do gás, como o aumento da temperatura, da pressão e da densidade.

Há três tipos de fenômenos que geram as frentes de choque em aglomerados de galáxias (Markevitch e Vikhlinin, 2007):

1. Jatos de AGNs, ao expelir matéria para o ICM no centro de aglomerados, podem formar frentes de choque quando esse gás colide com o meio externo à galáxia;
2. Simulações cosmológicas preveem um meio intergaláctico (IGM, do inglês *intergalactic medium*) bem mais frio ($10^{5-7} K$) do que o ICM ($10^{7-8} keV$). A colisão entre estes dois meios geraria frentes de choque intensas. Entretanto, elas nunca foram observadas por estarem em regiões de brilho superficial em raios X muito baixos;
3. A colisão entre aglomerados ou grupos de galáxias podem gerar frentes de choque, caso o gás do sistema em queda seja denso o suficiente para resistir ao encontro com o ICM denso. Um exemplo deste fenômeno pode ser visto na Fig. 1.2, com os perfis radiais de temperatura e brilho superficial na Fig. 1.8.

O aumento de densidade que ocorre em frentes de choque tem forma aproximadamente semi-circular, pois é a projeção de uma frente 3D esferoidal (Markevitch e Vikhlinin, 2007). Ele pode ser detectado através do aumento de brilho superficial, já que a emissão é proporcional à densidade ao quadrado (veja eq. 1.5). Essa descontinuidade pode ser mais facilmente observada no perfis radial de brilho superficial, que mostra como essa quantidade varia com a distância ao centro. Conforme essa onda de choque passa com velocidade supersônica através do gás, ela aquece o meio ao mesmo tempo em que aumenta a pressão. Essa perturbação faz com que o gás deixe de estar em equilíbrio hidrodinâmico durante a passagem da frente. Um exemplo de perfil radial de brilho superficial e de temperatura pode ser conferido na Fig. 1.8.

Descobertas nos aglomerados Abell 2142 e Abell 3667 (Markevitch *et al.*, 2000; Vikhlinin *et al.*, 2001), as frentes frias (*cold fronts*) também representam descontinuidades em raios X. Para que fossem frentes de choque, a temperatura interna à frente deveria ser maior do que a temperatura externa a esta. Entretanto, é observado o comportamento contrário. Na Fig. 1.9 é mostrado um exemplo de frente fria detectado em A2142 por Markevitch *et al.* (2000).

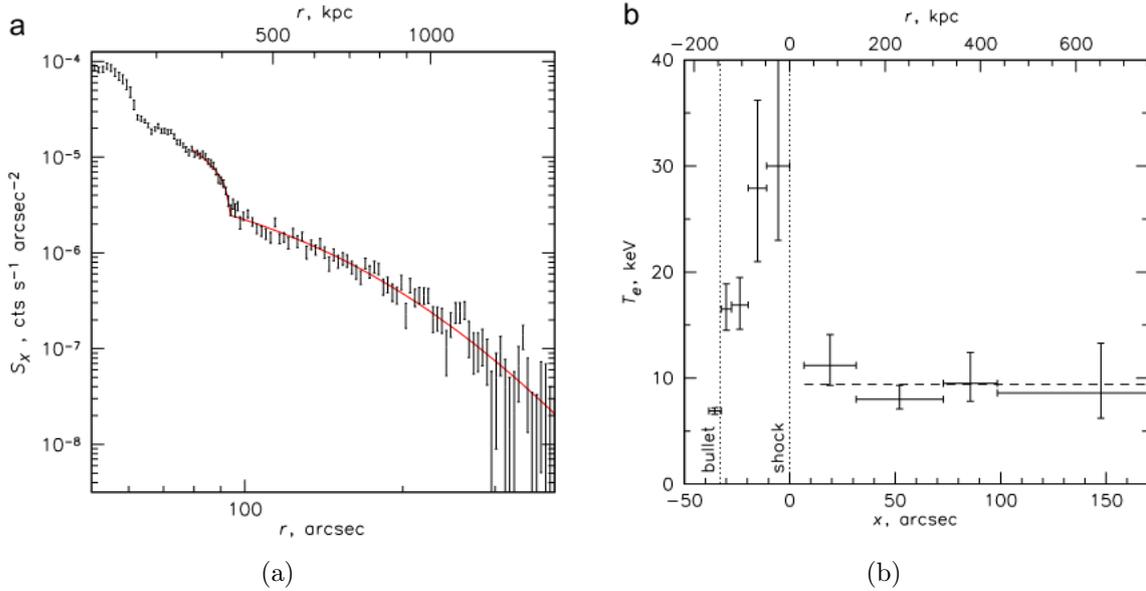


Figura 1.8: Perfis radiais de brilho superficial (a) e temperatura projetada (b) para o *Bullet Cluster*. A coordenada X em (a) começa no centro de curvatura da frente de choque, enquanto que em (b) a coordenada $x = 0$ coincide com a frente de choque. A linha vermelha sólida na figura (a) representa o melhor ajuste da projeção de uma descontinuidade de densidade esférica (Markevitch e Vikhlinin, 2007). As linhas pontilhadas na figura (b) representam a “bala” (grupo de galáxias à direita na Fig. 1.2) e a frente de choque, conforme indicado na figura. Os erros representam 68% de confiança. Retirado de Markevitch e Vikhlinin (2007).

Além da temperatura interna à frente ser menor do que a temperatura externa, sua velocidade de propagação é subsônica e não há um aumento de pressão através da descontinuidade, sendo este último valor constante através da frente fria.

Um dos possíveis cenários para a formação de frentes frias é o chacoalhamento (tradução livre de *sloshing*) do núcleo denso do aglomerado. Neste cenário, o gás frio do núcleo do aglomerado se desloca do centro do poço de potencial e oscila ao redor deste, criando padrões espirais e frentes frias. Uma simulação deste fenômeno foi feita por Ascasibar e Markevitch (2006) e pode ser vista na Fig. 1.10, onde pode-se ver o padrão espiral mencionado.

Padrões similares às essas simulações foram observados por Dupke *et al.* (2007), os quais notaram uma semelhança de configuração morfológica na distribuição de temperaturas provenientes das simulações de Ascasibar e Markevitch (2006) ao descrever as frentes frias presentes em Abell 496, dada a incrível similaridade do que é observada em raios X para esse aglomerado (veja Fig. 1.11) e o previsto pelas simulações.

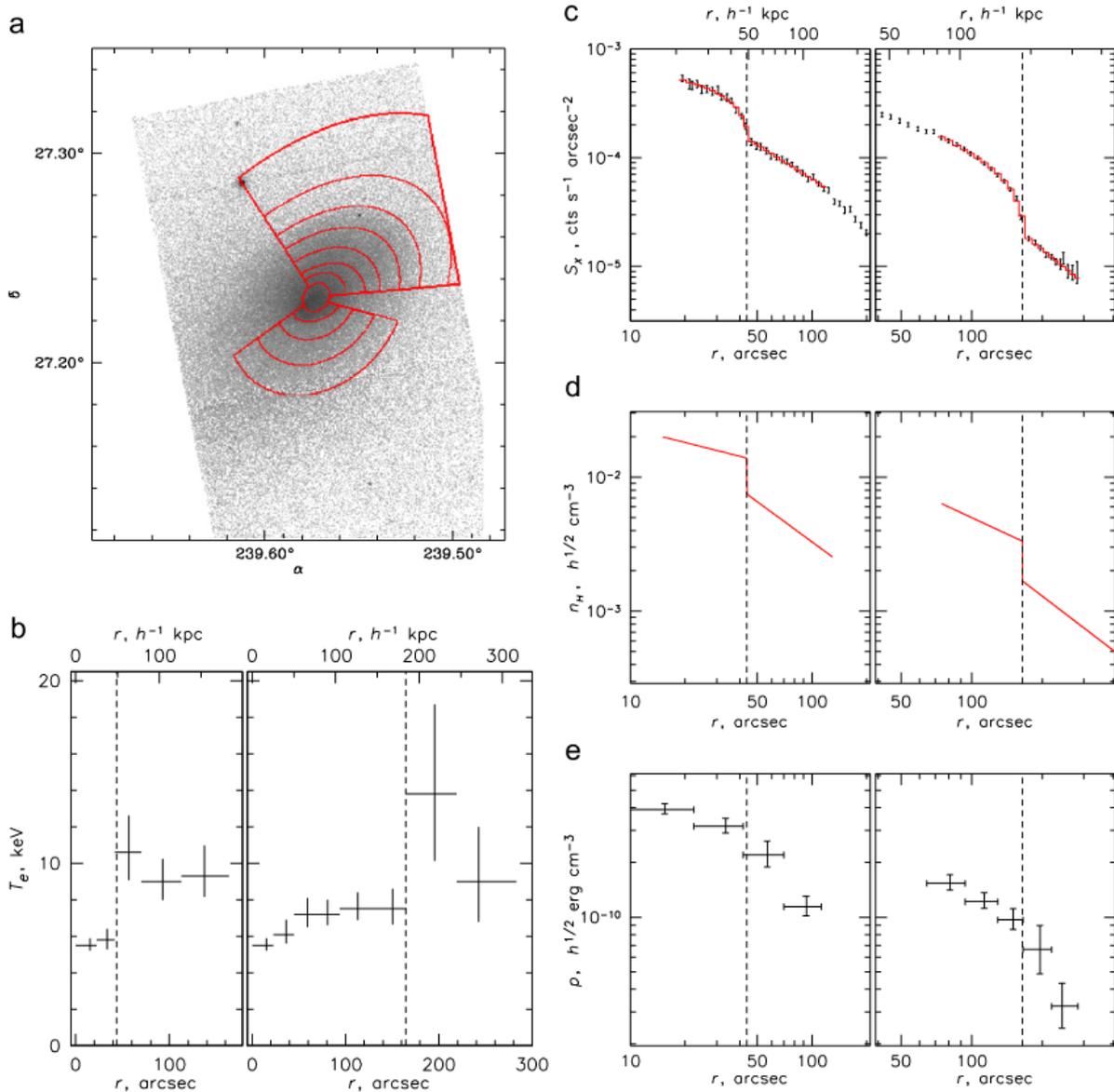


Figura 1.9: Frentes frias em A2142, retiradas de [Markevitch et al. \(2000\)](#). (a) regiões utilizadas para a criação do perfil de temperatura sobreposta à imagem em raios X. Nas figuras (b) a (e), os perfis a esquerda representam a frente ao sul do centro do aglomerado e os perfis a direita representam a frente ao norte. As linhas tracejadas verticais representam a posição da frente fria. Os perfis radiais de temperatura, brilho superficial e pressão podem ser vistos, respectivamente, nas figuras (b), (c) e (e). A linha vermelha na figura (d) representa o modelo que melhor se ajusta ao perfil de densidade, que está plotado como um histograma vermelho em (c). Os erros são de 90%.

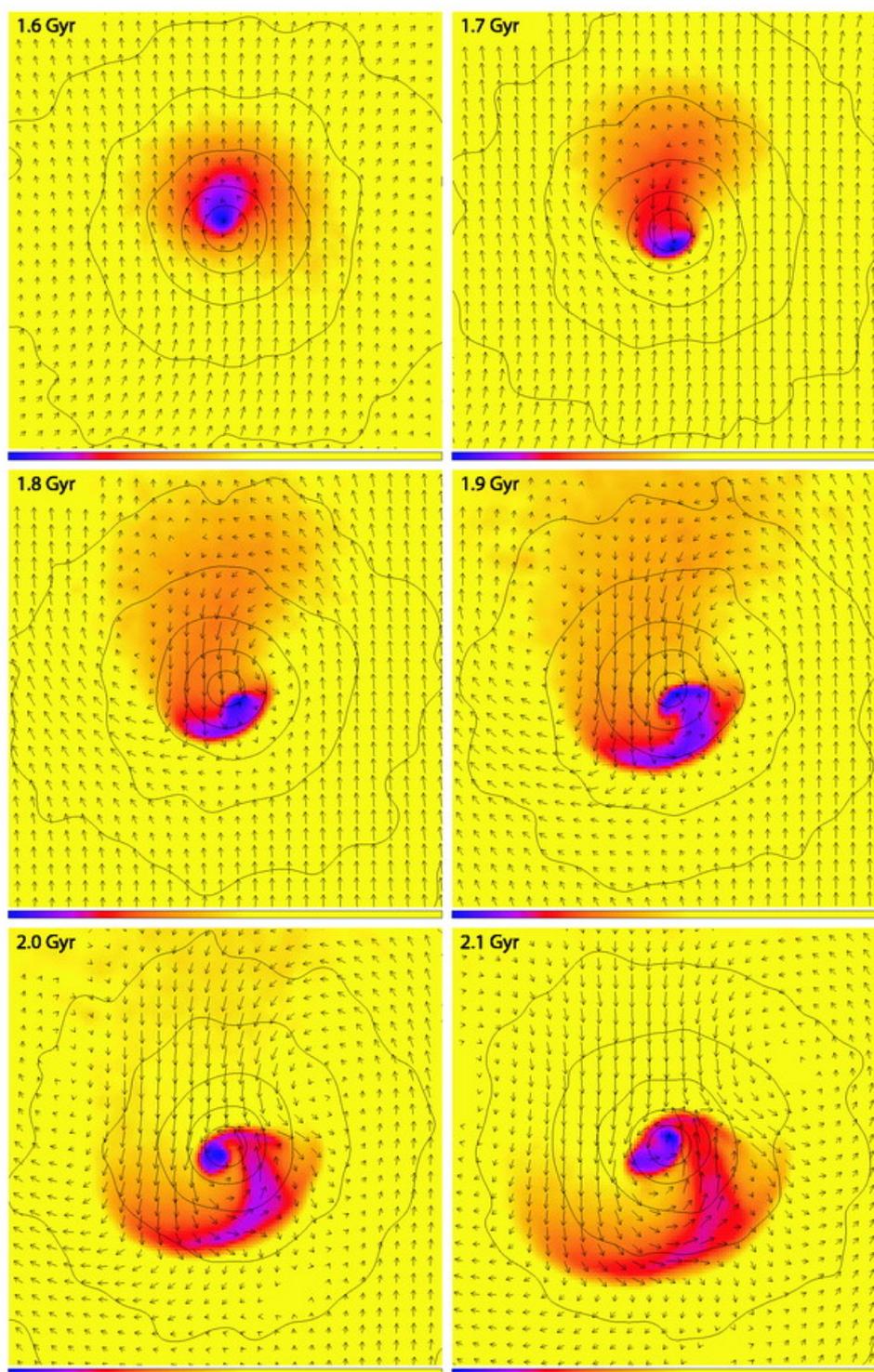


Figura 1.10: Simulação de chacoalhamento de gás frio no núcleo do aglomerado feita por [Ascasibar e Markevitch \(2006\)](#), com as cores representando a temperatura. Azul é 2 keV e amarelo é $7 - 9 \text{ keV}$. Os isocontornos representam a distribuição espacial de matéria escura em escala logarítmica. As setas representam a velocidade do gás, com seu tamanho indicando o módulo da velocidade, que varia entre 30 km/s e 500 km/s . A velocidade do som para o gás quente em amarelo é $1300 - 1500 \text{ km/s}$.

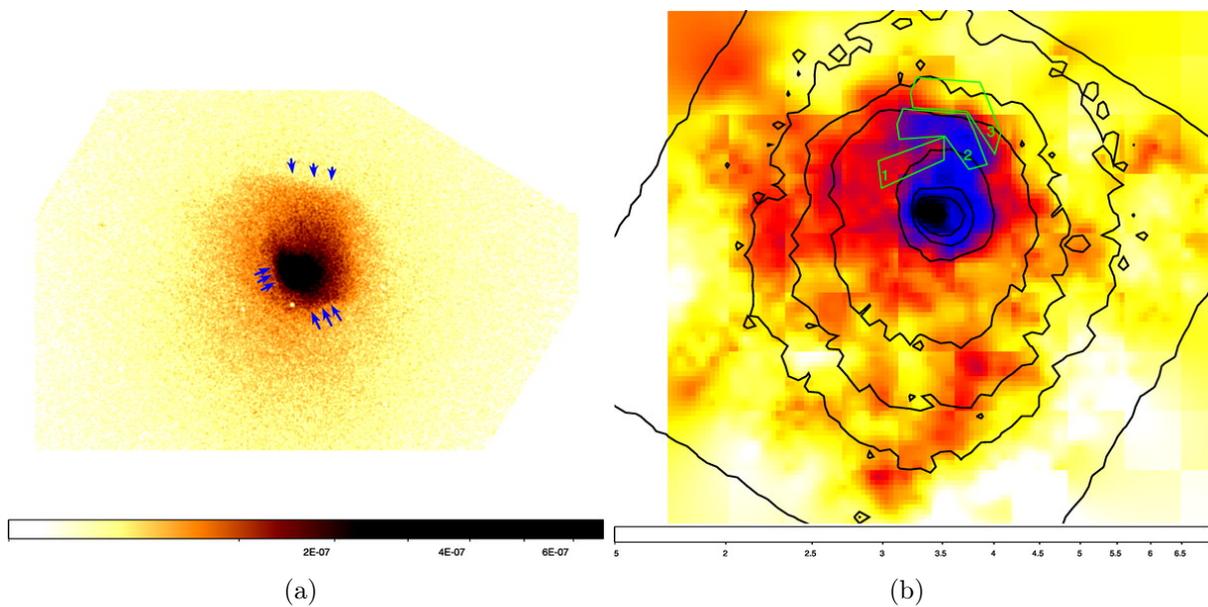


Figura 1.11: (a) mostra a imagem em raios X de A496 obtida pelo Chandra, onde as setas azuis marcam as frentes frias. Em (b) temos o mapa de temperatura elaborado com uma técnica semelhante à adotada neste trabalho. As regiões 1, 2 e 3 possuem temperatura de $3,5 \pm 0.11 \text{ keV}$, $3,08 \pm 0.07 \text{ keV}$ e $4,7 \pm 0.22 \text{ keV}$, respectivamente. As figuras foram compiladas de Dupke *et al.* (2007).

Capítulo 2

Abell 3571

Localizado no Superaglomerado de Shapley, A3571 é um aglomerado Bautz-Morgan tipo I, classe de riqueza 2 no catálogo de Abell e apresenta um *redshift* de $z = 0,039$. É um aglomerado irregular, que apresenta uma elongação na direção Norte-Sul tanto em raios X quanto na sua distribuição espacial de galáxias.

Apesar de ser o sexto aglomerado mais brilhante em raios X (Edge *et al.*, 1990), o aglomerado A3571 apresenta poucos trabalhos detalhados sobre suas propriedades físicas. Geralmente é incluído em amostras de dezenas de aglomerados (e.g., Leccardi *et al.*, 2010; Lopes *et al.*, 2018; Rossetti e Molendi, 2010) em que são estudadas características gerais a aglomerados de galáxias, como a presença ou não de um *cool core* e características químicas e termodinâmicas do ICM. Entretanto, as análises feitas não consideram detalhes

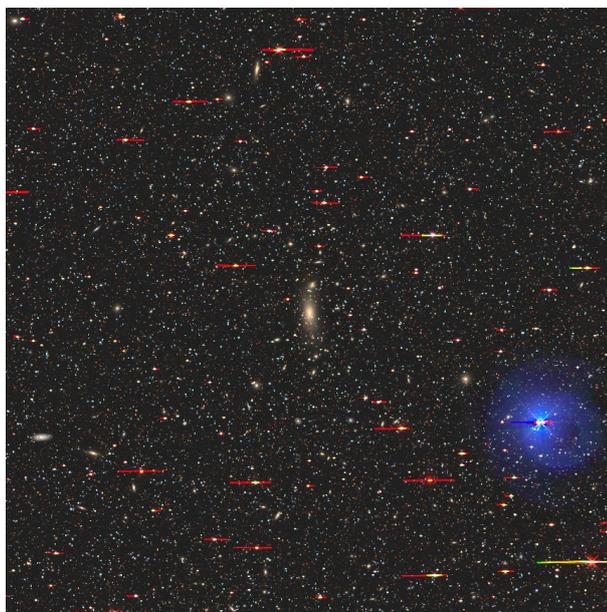


Figura 2.1: Imagem no óptico de A3571 composta pelos filtros g, r e z da *Dark Energy Camera*, centrada na BCG em $\alpha = 13^h 47^m 28^s.4$, $\delta = -32^\circ 51' 54''.0$, J2000, com ~ 1 grau de lado. Norte é para cima e leste para a esquerda, assim como nas demais figuras, salvo indicação contrária.

suficientes do sistema para se determinar de maneira precisa seu estado dinâmico, gerando interpretações controversas entre os trabalhos feitos com diferentes critérios.

No caso de Lopes *et al.* (2018), embora tenham sido feitas afirmações quanto ao estágio evolutivo dos aglomerados pertencentes à amostra estudada (A3571 incluído), Laganá *et al.* (2019) ressalta que os critérios utilizados para o diagnóstico de aglomerados *cool cores* simplifica muito a classificação, sendo a análise de mapas espectrais uma etapa fundamental para a correta interpretação de seu estado dinâmico. A seguir, será apresentado um resumo dos principais trabalhos e conclusões feitos sobre A3571.

2.1 Óptico e rádio

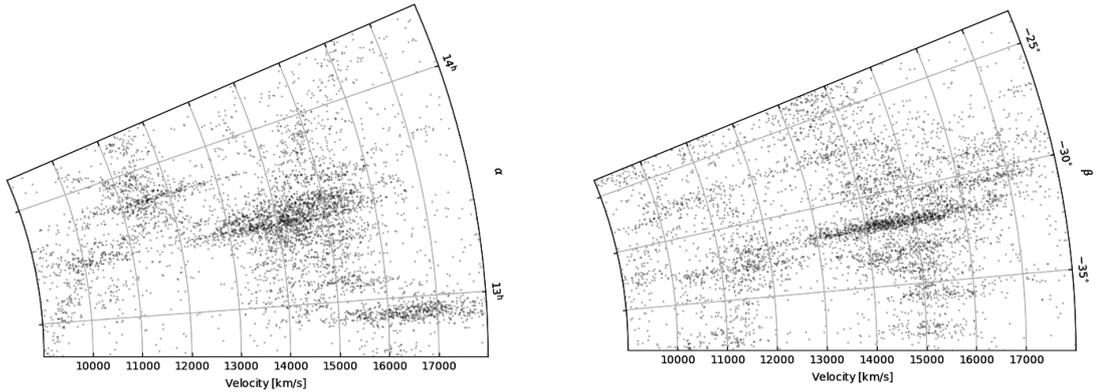
Quintana *et al.* (2020) apresenta um catálogo de velocidade radiais do Superaglomerado de Shapley baseado em um compilado de 18129 medidas de velocidades para 10702 galáxias entre $12^h43^m00^s < AR < 14^h17^m00^s$ e $-23^\circ30'00'' > Dec > -38^\circ30'00''$. Com esse catálogo de velocidades, estruturas presentes no superaglomerado puderam ser melhor definidas em relação a levantamentos anteriores, como uma ponte de galáxias com velocidades entre 10000 e 13000 $km\ s^{-1}$ ligando uma concentração de galáxias centrada em A3571 ao complexo de aglomerados principal de Shapley, cujo principal membro é A3558 (Quintana *et al.*, 2020). Na Fig. 2.2(a), podemos ver essa estrutura filamentar que liga os dois complexos de aglomerados.

O primeiro trabalho dedicado exclusivamente ao A3571 foi realizado por Quintana e de Souza (1993), que analisou a dispersão de velocidades e a densidade de galáxias, encontrando um *redshift* médio de 0,0384 e dispersão de velocidades $1022_{-77}^{+99}\ km\ s^{-1}$. Seguindo os contornos apresentados na Fig. 2.3(a), três regiões foram destacadas neste trabalho (veja Fig. 2.3(b)), onde: a região A (Nordeste) apresentou uma velocidade média de $11800\ km\ s^{-1}$ e uma dispersão de velocidades de $750\ km\ s^{-1}$; a região B (Sul) tem velocidade média de $11200\ km\ s^{-1}$ com uma dispersão de velocidades de $1080\ km\ s^{-1}$; e a região C (centro) apresenta velocidade média de $11300\ km\ s^{-1}$ e uma dispersão de velocidades de $1100\ km\ s^{-1}$. É destacado ainda que a BCG não está no centro de densidade da concentração de galáxias, estando esta levemente deslocada. Quintana e de Souza (1993) concluem que A3571 não é um aglomerado relaxado dentro de $1\ Mpc$, indicando que as regiões externas estão colapsando, embora apresente uma emissão em raios X intensa no centro (característica de aglomerados relaxados). Além disso, o fato de a alongação da BCG coincidir com a alongação da distribuição das galáxias aponta para o cenário onde esta galáxia central teria se formado em um colapso anterior, sendo sua configuração geométrica resultado da anisotropia da nuvem original.

Venturi *et al.* (2002) discutem a emissão em rádio do complexo de aglomerados A3571, composto pelo próprio A3571 e os aglomerados pobres (classe de riqueza 0) vizinhos, A3572 (Sul) e A3575 (Leste). A observação utilizada foi realizada pelo ATCA (*Australia*



(a)



(b)

Figura 2.2: Em (a), temos o campo de densidade projetada em unidades de contagens por ângulo sólido em minutos de arco quadrado, indicando a distribuição numérica de galáxias do Superaglomerado de Shapley cuja velocidade radial está entre 9000 e 18000 km s^{-1} . Aglomerados conhecidos com velocidades radiais entre 8500 e 18500 km s^{-1} estão identificados na imagem com um **x**. Em (b), temos a projeção sobre AR (esquerda) e Dec (direita) da distribuição de galáxias com velocidades radiais entre 9000 e 18000 km s^{-1} . As imagens foram retiradas de [Quintana *et al.* \(2020\)](#).

Telescope Compact Array) nos comprimentos de onda de 22 cm e 13 cm ([Venturi *et al.*, 2002](#)). Das 124 fontes de rádio detectadas, 36 tem contrapartes no óptico (em sua maioria, galáxias *early-type*) e somente 6 ($\sim 17\%$) possuem *redshift* espectroscópicos medidos, todas pertencentes a A3571. Sobre as demais fontes de rádio com contrapartida no óptico

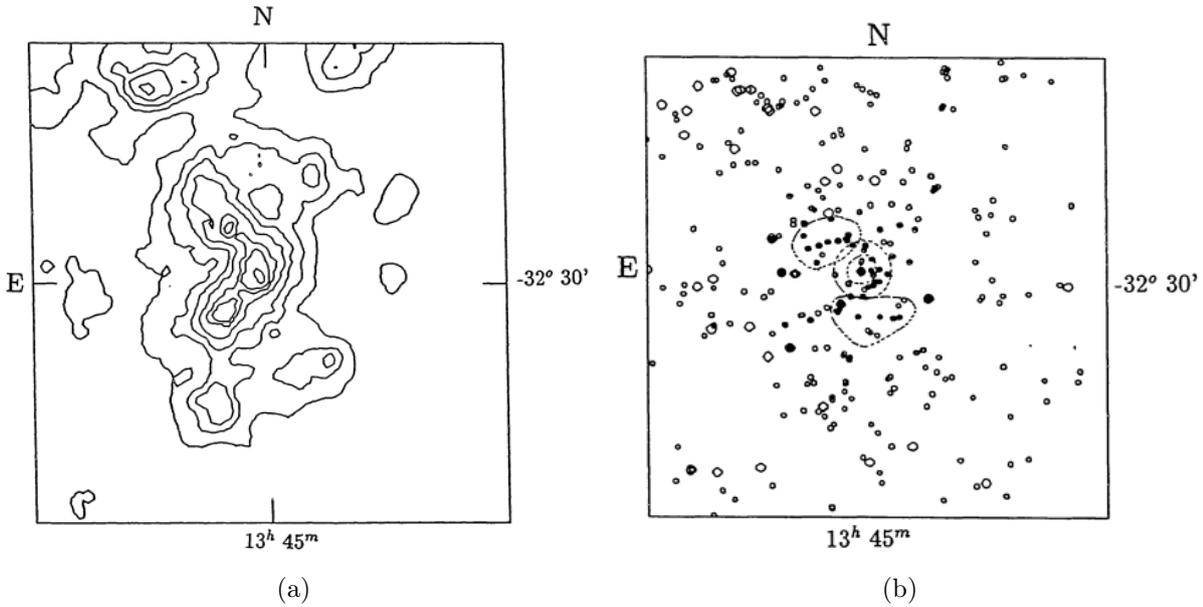


Figura 2.3: Imagens retiradas do trabalho de Quintana e de Souza (1993). (a) mapa de densidade de galáxias com dimensão $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ até magnitude 17, com níveis de contorno de 0,06, 0,10, 0,14, 0,24, 0,31, 0,4 e 0,6 galáxias por minuto de arco quadrado. (b) plot de galáxias com dimensão $1,2^\circ \times 1,2^\circ$, onde as galáxias mais brilhantes foram desenhadas com símbolos grandes e as que tiveram suas velocidades radiais medidas foram desenhadas com símbolos preenchidos; as regiões A (nordeste), B (Sul), C e C' (central exterior e inferior, respectivamente) são mostradas por linhas pontilhadas.

(sem *redshift*), nove estão associadas com galáxias mais brilhantes que $b_J \leq 18,5^1$, e estão localizadas entre A3571 e A3575. Venturi *et al.* (2002) propõe que o complexo A3571 é o estágio final de uma fusão, cujo produto final é o A3571. As propriedades da emissão em rádio de A3571 indicam que ele está relaxado em seu centro, mas dinamicamente ativo em sua periferia. No entanto, não está claro se A3572 e A3575 são os remanescentes dessa fusão ou se são sistemas menores que ainda vão interagir com A3571. As fontes de rádio detectadas e os contornos de densidade de galáxias no óptico apresentados por Venturi *et al.* (2002) podem ser conferidos na Fig. 2.4.

Lopes *et al.* (2018) aplicaram testes de subestruturas para uma amostra de 72 aglomerados de galáxias. Dentre os seis testes aplicados, A3571 foi considerado relaxado em todos eles, com exceção do teste β , onde é medido o nível de simetria de reflexão na distribuição de galáxias. Este resultado é devido, provavelmente, à alongação na distribuição espacial de galáxias na direção Norte-Sul. Como conclusão, os autores concordam com o cenário proposto por Venturi *et al.* (2002).

A3571 também aparece na amostra do programa LoVoCCS. O LoVoCCS (do inglês, *Local Volume Complete Cluster Survey*) é um programa em andamento que usa a Dark Energy Camera (DECam) – CCD imageador que conta com um campo de visão de 3

¹A banda b_j é definida pela resposta da emulsão Kodak IIIaJ em combinação com um filtro GG395, estando relacionada com a banda B no azul de acordo com $b_j = B - 0,28(B - V)$ (Colless *et al.*, 2001).

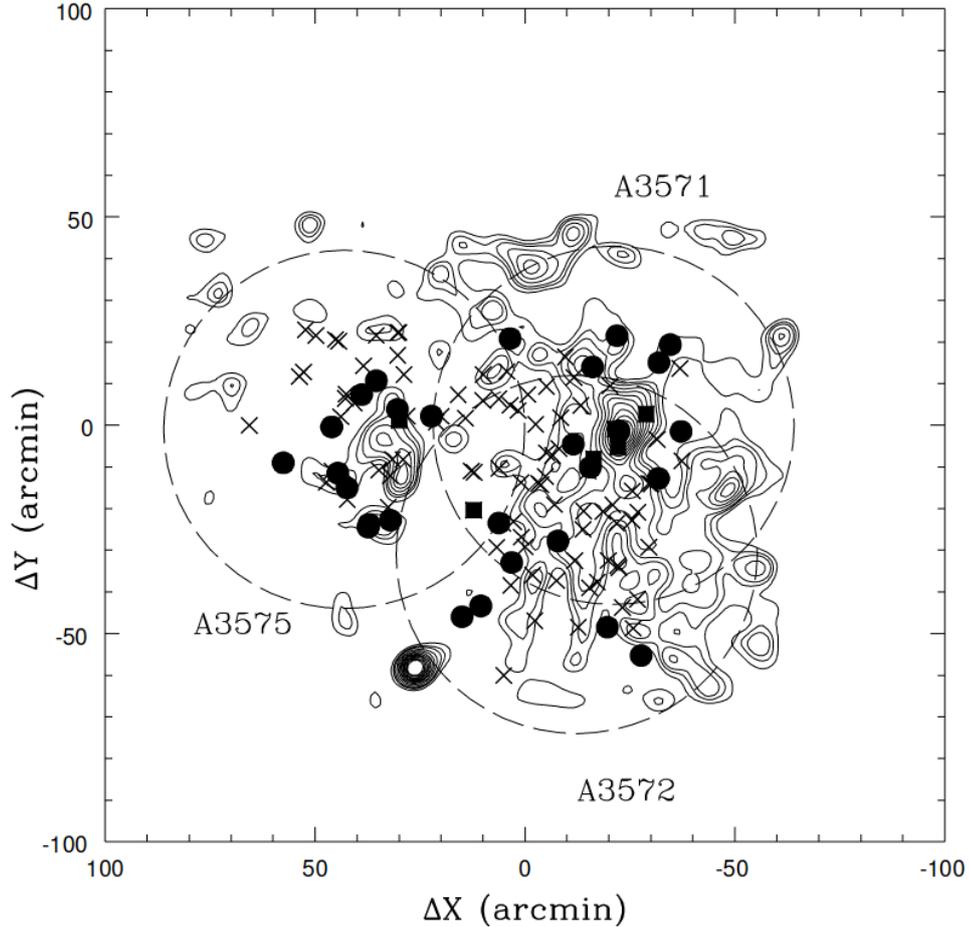


Figura 2.4: Fontes de rádio detectadas por [Venturi et al. \(2002\)](#), onde os quadrados preenchidos representam as fontes com medida de *redshift*, os círculos preenchidos são as fontes sem a medição de *redshift* e as cruzes são as fontes de rádio sem contrapartida no óptico. Os contornos de fundo representam a densidade de galáxias com magnitude até $b_j = 19,5$ e os círculos tracejados marcam 1 Raio de Abell partindo do centro de cada um dos aglomerados. A figura está centrada em $\alpha = 13^h 49^m 10^s$, $\delta = -32^\circ 31' 47''$.

graus quadrados e uma resolução angular de 0,263 segundos de arco – para mapear a matéria escura e a distribuição de galáxias em 107 aglomerados de galáxias próximos ($0,03 \leq z \leq 0,12$) e brilhantes em raios X ($[0,1 - 2,4 \text{ keV}]L_{X500} > 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$, onde L_{X500} é a luminosidade em raios X dentro de R_{500}) ([Fu et al., 2022](#)).

Em [Fu et al. \(2024\)](#), foram feitos mapas 2D de distribuição de massa através de análises por lenteamento gravitacional fraco, distribuição de galáxias da sequência vermelha (RS, do inglês *red-sequence*) e a BCG dos aglomerados da amostra. Aglomerados de galáxias apresentam uma população de galáxias elípticas/*early-type* característica, formadas devido ao processo de fusão entre as galáxias e/ou *quenching* ([Fu et al., 2024](#)). Em um diagrama cor-magnitude, essas galáxias membro do aglomerado formam uma sequência vermelha e sua distribuição espacial traça a distribuição geral de matéria no aglomerado ([Fu et al., 2024](#)).

Como conclusão geral deste último trabalho, foi observado um forte alinhamento entre a distribuição 2D de galáxias da RS e a alongação da BCG (diferença média de alinhamento de 19° dentro de 2 Mpc) e um alinhamento entre a distribuição 2D de galáxias da RS com a distribuição de massa geral do aglomerado (diferença média de 32° dentro de 1 Mpc). Esses alinhamentos sugerem uma coevolução dinâmica de longo prazo dos constituintes dos aglomerados em escalas de tempo cósmicas (Fu *et al.*, 2024).

Especificamente sobre A3571 (mapa elaborado pode ser visto na Fig. 2.5), os autores citam uma concordância entre a direção de alongação da BCG ($\theta_{BCG} = 5^\circ$), da distribuição de massa ($\theta_{M5} = -25^\circ$, $\theta_{M10} = -28^\circ$, $\theta_{M20} = -72^\circ$), da distribuição de galáxias da RS ($\theta_{R5} = -6^\circ$, $\theta_{R10} = -2^\circ$, $\theta_{R20} = -4^\circ$) e da distribuição de gás em raios X (7° , segundo Hudaverdi *et al.* (2005)). É dito que a sobredensidade de massa na direção noroeste do centro é devida, provavelmente, a um grupo de galáxias membro. A concentração de massa observada a sudoeste é associada pelos autores a uma possível estrutura no plano de fundo.

2.2 Raios X

A massa para A3571 foi calculada por Nevalainen *et al.* (2001) utilizando simultaneamente dados dos telescópios ASCA e BeppoSAX através do perfil radial de temperatura e do perfil radial de densidade. O método utilizado para o cálculo da massa através da emissão em raios X está explicado em detalhes em §3.4.

Os valores de massa obtidos por Nevalainen *et al.* (2001) foram $M_{\text{tot}}(< 25,9' = r_{500}) = 7,9^{+2,5}_{-1,4} 10^{14} M_\odot$ e $M_{\text{tot}}(< 38,4' = r_{178}) = 9,1^{+3,6}_{-1,5} 10^{14} M_\odot$. Entretanto vale ressaltar que o método utilizado somente é válido para um aglomerado relaxado, sendo o estado dinâmico essencial para determinar a validade dos resultados obtidos.

Hudaverdi *et al.* (2005) apresenta os primeiros mapas de pressão, entropia, razão de dureza e largura equivalente para A3571, feitos com uma observação do XMM-Newton. A razão de dureza, calculada como $I(1,6 - 10,0)keV/I(0,8 - 1,6)keV$, está relacionada com a temperatura, já que uma região com temperaturas mais elevadas apresentará em média fótons mais energéticos. Na Fig. 2.6 pode-se ver a diferença no fluxo de uma fonte com temperatura $1,6 keV$ e outra com temperatura $10 keV$. O fluxo de raios X duros (com energia maior que $1,6 keV$) é visivelmente maior na fonte com maior temperatura. Hudaverdi *et al.* (2005) encontraram uma variação de temperatura de $2 keV$ ao redor da temperatura média do ICM, $7,1 keV$. A análise de abundância é feita através da largura equivalente, definida como

²O ângulo da distribuição de massa medido à uma distância maior do centro pode ter sofrido a influência de estruturas do plano de fundo de forma mais significativa devido ao baixo *redshift* e, consequentemente, baixo S/N.

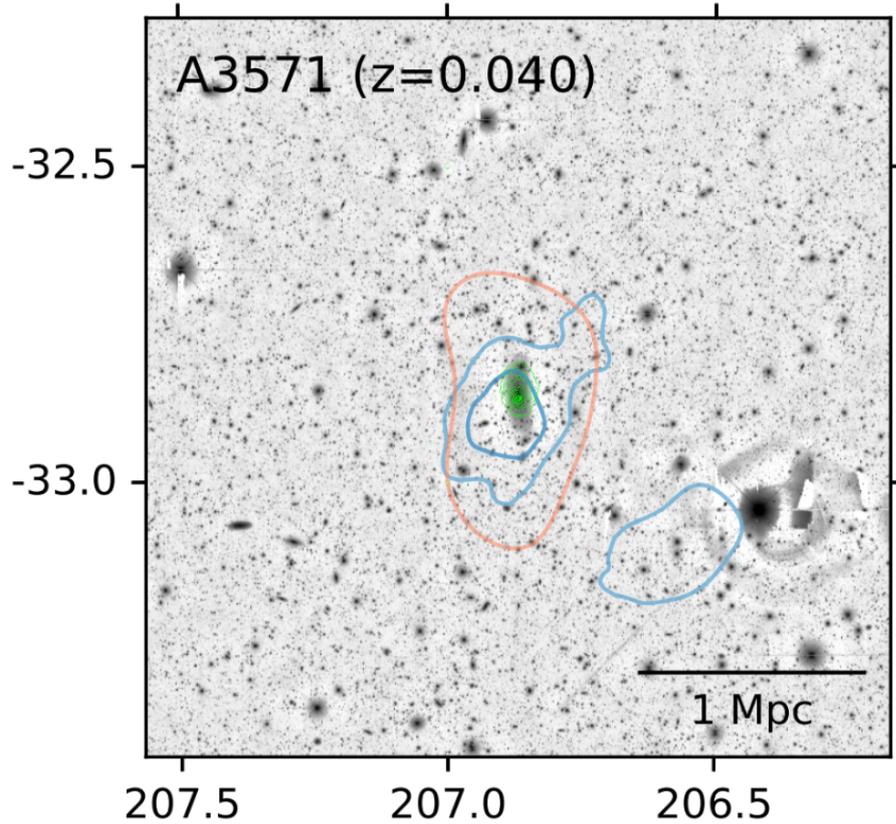


Figura 2.5: Contornos gerados por lenteamento gravitacional fraco, onde os contornos em azul representam a distribuição de massa do aglomerado, sendo o contorno ao sudoeste e o central externo equivalentes a $S/N = 2\sigma$ e central interno equivalente a $S/N = 3\sigma$. O mapa de S/N representa a concentração de massa, onde um valor maior de S/N indica uma maior concentração de matéria. Já o contorno em vermelho representa a distribuição espacial de galáxias da sequência vermelha, indicando uma densidade de 0,024 galáxias por 100×100 pixels ($26,3'' \times 26,3''$). Esse mapa de A3571, que conta com a imagem no óptico na banda r invertida feita pela DECam como fundo, foi apresentado por [Fu et al. \(2024\)](#). O contorno em verde no centro do aglomerado é o mesmo das demais figuras e representa o brilho superficial dado pela observação feita com o Chandra.

$$EW \equiv \frac{[I_{6-6,8} - (0,064 \times I_{3-6})]}{[(0,064 \times I_{3-6})]} \quad (2.1)$$

onde $I_{6-6,8}$ representa a intensidade na faixa entre 6 keV e $6,8 \text{ keV}$, que compreende a região de ocorrência da linha de $\text{Fe K}\alpha$, e I_{3-6} , onde não ocorrem linhas intensas, representa a intensidade do contínuo e 0,064 é a razão prevista entre o contínuo nessas duas faixas de energia. A pressão e a entropia foram calculadas, respectivamente, segundo $P \sim nkT$ e $S \sim kTn^{-2/3}$, sendo k a constante de Boltzmann, T a temperatura e n a densidade. Não foram feitas considerações sobre as unidades utilizadas e a escala de cor dos mapas é representada por $HR \times I^{1/2}$ e $HR \times I^{-1/3}$, respectivamente.

[Hudaverdi et al. \(2005\)](#) concluem que A3571 não sofreu um *major-merger*³ recente-

³Um *major-merger* ocorre quando dois aglomerados de galáxias colidem e suas massas são similares.

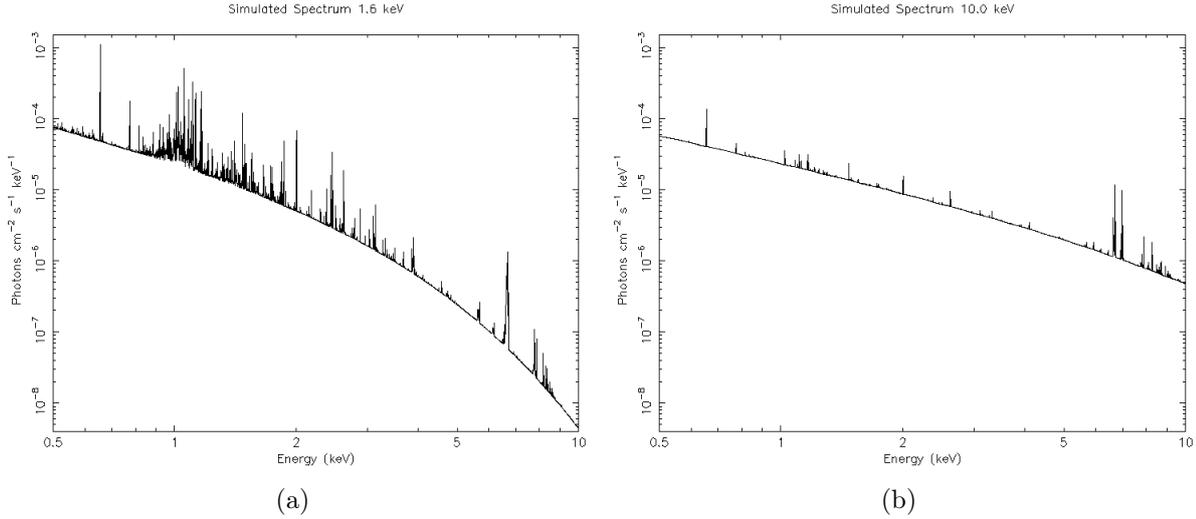


Figura 2.6: Espectros em raios X simulados com um modelo *apec*, com abundância $0,3 Z_{\odot}$, *redshift* 0,039, normalização 10^{-4} . A temperatura atribuída em (a) foi $1,6 \text{ keV}$ e para (b) foi 10 keV .

mente, dada a pequena variação de temperatura, mas apresenta sinais da queda de um grupo. Se assumimos que a região C1, com temperatura $6,0 \pm 0,4 \text{ keV}$, e a região D4 ($6,4 \pm 0,6 \text{ keV}$) têm a mesma temperatura, ou seja, fazem parte da mesma estrutura, esta seria um grupo de galáxias em queda no aglomerado (Hudaverdi *et al.*, 2005). O cenário proposto por Hudaverdi *et al.* (2005) sugere que a origem da região de baixa entropia no noroeste (coincidente com as regiões C1 e D4) é o gás arrancado deste subgrupo em queda, sendo o centro de A3571 o remanescente deste sistema, o que é inconsistente com o cenário proposto por Venturi *et al.* (2002), onde A3571 está relaxado em seu centro.

Por meio do telescópio ASCA, Dupke (1998) analisou a abundância na região interna e externa de A3571. Apesar de apresentar uma abundância maior na região interna ($Z = 0,37 Z_{\odot}$ dentro de $140 h_{50}^{-1} \text{ kpc}$), a queda de abundância observada para a região externa não foi tão intensa ($Z = 0,28 Z_{\odot}$). Dada a temperatura elevada do aglomerado ($T \approx 7 \text{ keV}$), o gradiente de abundância pode ter sido mascarado pela PSF do ASCA (Dupke, 1998). Esses resultados são condizentes com o enriquecimento do meio através de *ram-pressure stripping*, onde o gás rico em ferro (proveniente de supernovas tipo Ia) de galáxias espirais é arrancado das galáxias e depositado no ICM denso devido à pressão de arrasto. As distribuições de temperatura e abundância com os respectivos valores para as regiões internas e externas do aglomerado podem ser conferidos na Fig. 2.8.

Batalha *et al.* (2022) analisou uma amostra de 18 aglomerados e grupos de galáxias através de observações do SUZAKU. O satélite SUZAKU foi desenvolvido pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) e lançado em 2005, encerrando sua missão em

Planelles e Quilis (2009), por exemplo, adota o critério onde, para uma colisão entre um aglomerado de massa M e outro de massa $m < M$, um *major-merger* ocorre para $M : m < 3 : 1$ e um *minor-merger* acontece quando $3 : 1 < M : m < 10 : 1$.

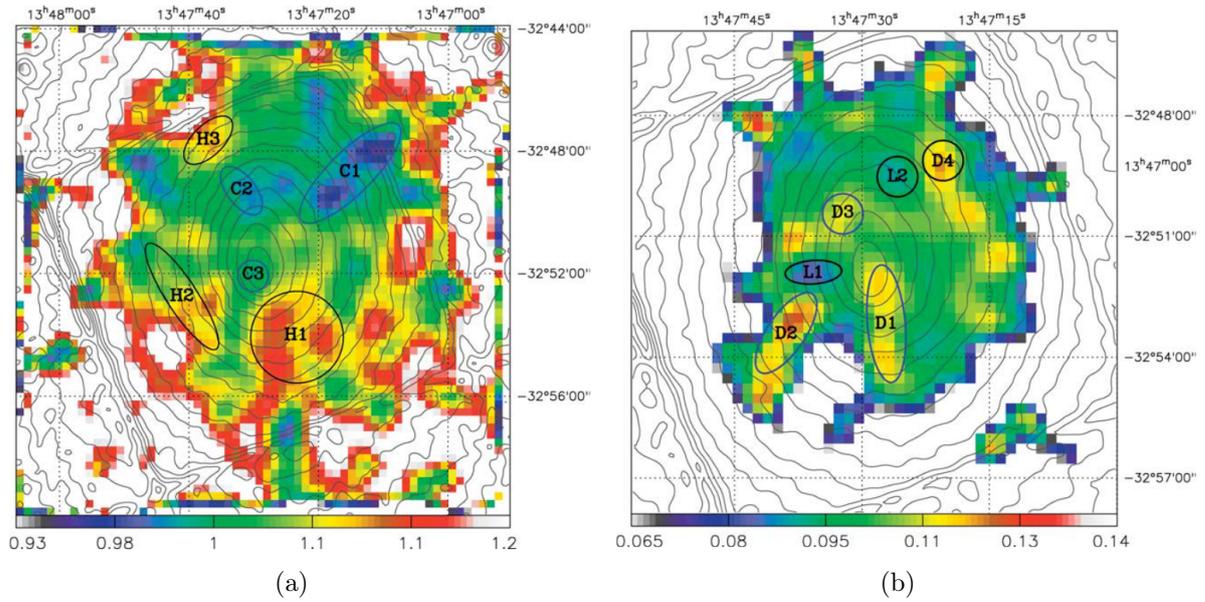


Figura 2.7: Mapas de razão de dureza (a) e largura equivalente (b) elaborados por Huda-verdi *et al.* (2005). As cores em (a) representam $I(1,6 - 10,0)keV/I(0,8 - 1,6)keV$ e em (b), representam os valores de largura equivalente dados pela equação 2.1. Em ambos os mapas, cada pixel tem tamanho de $15''$.

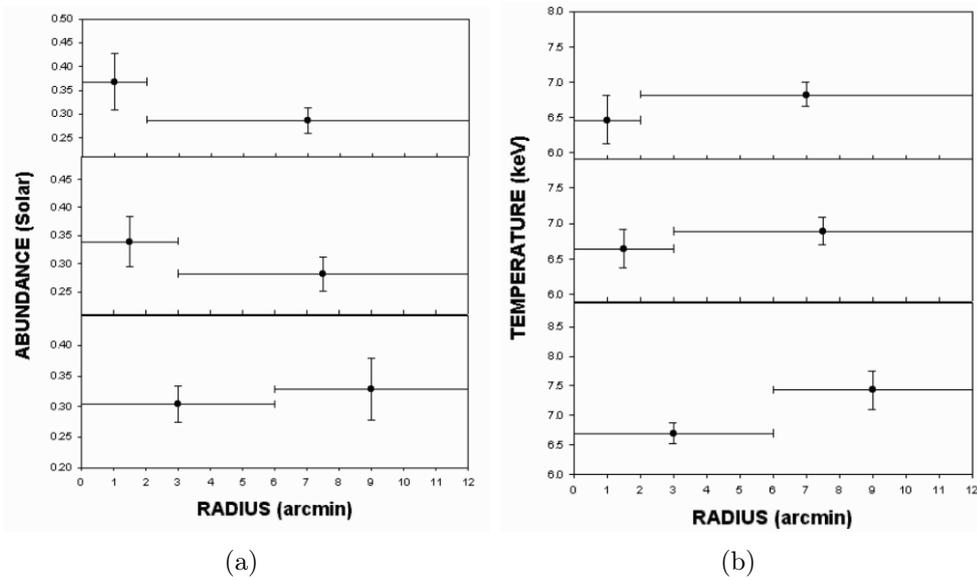


Figura 2.8: Distribuição de temperatura (a) e abundância (b) para A3571 apresentados por Dupke (1998). Os valores obtidos através de ajustes espectrais de GIS 2 e 3 e SIS 0 e 1 simultaneamente, com 90% de confiança (Dupke, 1998).

2015 devido a problemas de comunicação. Ele possuía três instrumentos: o espectrômetro em raios X (XRS) composto de um microcalorímetro com resolução espectral de $6 eV$ FWHM, no entanto, esse instrumento apresentou uma falha no sistema de refrigeração e perdeu seu estoque de hélio líquido, deixando de funcionar 29 dias após o lançamento; o espectrômetro imageador em raios X (XIS) com FoV de $18' \times 18'$, abrangendo a faixa

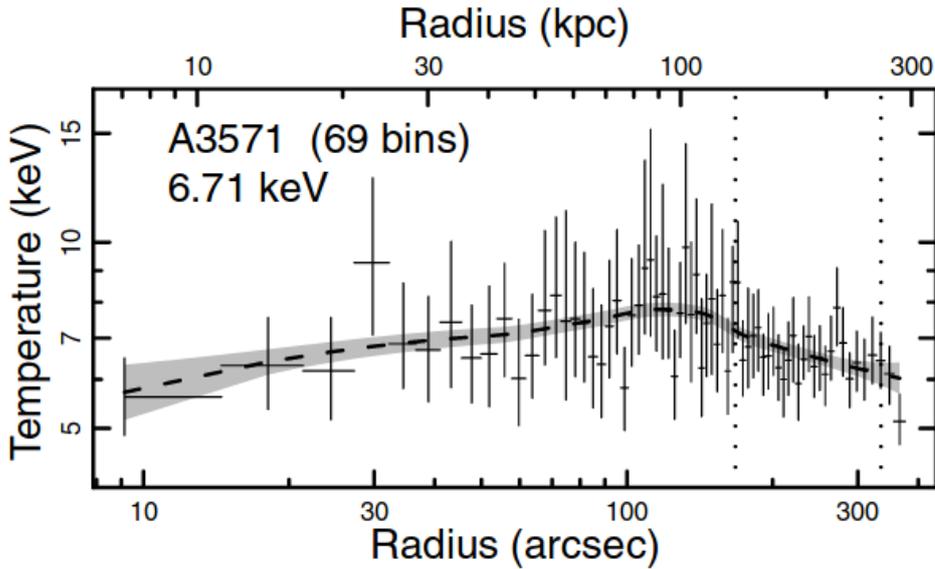


Figura 2.9: Perfil radial de temperatura para o A3571 produzido por Sanderson *et al.* (2006). O erro apresentado pela área em cinza é de 1σ . As linhas pontilhadas verticais representam a região $0,1 - 0,2 r_{500}$.

de energia $0,2 - 12 \text{ keV}$ com uma resolução espectral de 130 eV em 6 keV ; e o detector de raios X duros (HXD) que abrangia a faixa de energia $10 - 600 \text{ keV}$. Em Batalha *et al.* (2022), foram analisadas regiões internas e externa de cada um dos sistemas da amostra, sendo a região interna um círculo com raio adequado para contabilizar o *cool-core* e evitar contaminações devido à PSF do satélite SUZAKU. No caso do A3571, o raio interno foi de $100 \text{ kpc} \approx 2,2'$. A região externa tem raio $\geq 5'$. As abundâncias de ferro (interno, $0,35 \pm 0,01 Z_{\odot}$ e externo, $0,19 \pm 0,01 Z_{\odot}$) e oxigênio (interno, $0,3 \pm 0,2 Z_{\odot}$ e externo, $0,8 \pm 0,3 Z_{\odot}$) são condizentes com um cenário de enriquecimento por *ram-pressure stripping* no núcleo do aglomerado.

A3571 compõe a amostra de Sanderson *et al.* (2006) de 20 aglomerados observados pelo Chandra, dos quais foram feitos perfis radiais de temperatura. Para o aglomerado de interesse nesta dissertação, foi encontrado uma temperatura do núcleo ($r < 0,1 r_{500}$) de $T_c = 7,85 \pm 0,17 \text{ keV}$ e temperatura média (calculada entre $0,1 r_{500}$ e $0,2 r_{500}$) de $T_m = 6,71^{+0,15}_{-0,42} \text{ keV}$, resultando em uma razão $T_m/T_c = 0,85 \pm 0,04$. Os autores definem que um aglomerado *cool core* deve apresentar uma razão entre as temperaturas do núcleo e temperatura média maior que 3σ de significância, ou seja, a razão deve ser maior ou igual a $1 + 3\sigma$. Como a razão para A3571 é $3,6\sigma$ menor do que 1, os autores concluem de que A3571 não possui um núcleo frio. O perfil radial de temperatura produzido neste trabalho pode ser conferido na Fig. 2.9.

Bîrzan *et al.* (2012) afirmam que provavelmente havia um *cool-core* em A3571, mas este teria sido aquecido por uma fusão. Rossetti e Molendi (2010) apontam a regularidade da emissão em raios X do aglomerado como indicação de relaxação, mas a alta temperatura do núcleo faz com que este seja classificado como não *cool-core*. Já Leccardi *et al.* (2010)

afirma que, mesmo o *cooling time* no núcleo de A3571 seja $1,3 \times 10^9$ anos, como não há uma queda de temperatura significativa nesta região, este aglomerado foi classificado como um estágio intermediário entre *cool-core* e não *cool-core*. Sobre o cenário proposto por Venturi *et al.* (2002), os autores afirmam que não foram apresentadas evidências suficientes para considerar um evento de fusão.

Laganá *et al.* (2019) criaram mapas espectrais 2D para uma amostra de 53 aglomerados de galáxias a partir de observações do XMM-Newton, analisando temperatura, pseudo-pressão (definida como $P \propto kT \times I^{1/2}$, onde I é a intensidade dada em contagens líquidas por segundo de arco quadrado), pseudo-entropia (dada por $S \propto kT \times I^{-1/3}$) e metalicidade para cada um dos alvos. Mapas espectrais representam a distribuição espacial dos parâmetros termodinâmicos em diferentes regiões do aglomerado, os quais são definidos a partir do espectro de cada região. Os mapas elaborados para A3571 podem ser vistos na Fig. 2.10. As conclusões obtidas através da análise dos mapas foram comparadas com as interpretações do estado dinâmico quando se utilizam somente diagnósticos de *cool-core*, semelhantes aos usados por Lopes *et al.* (2018). De forma geral, Laganá *et al.* (2019) concluem que os mapas espectrais 2D são uma melhor ferramenta para se determinar o estado dinâmico de aglomerados de galáxias, sendo os critérios de *cool-core* mais bem utilizados em amostras maiores. Especificamente sobre A3571, foi ressaltado que este sistema geralmente é classificado como relaxado, sendo o trabalho de Venturi *et al.* (2002) uma exceção ao propor o cenário de que este seria o estágio final de uma fusão. Foi ressaltado que não há a presença de um *cool-core* evidente no mapa de temperatura e o mapa de metalicidade é bastante irregular. No entanto, este aglomerado é classificado como *cool core* em todos os critérios de diagnósticos utilizados e como relaxado pelos mapas 2D, contradizendo as características observadas nos mapas.

O método adotado para a obtenção da pressão e entropia na elaboração desses respectivos mapas para A3571, onde foi adotada uma aproximação da raiz quadrada da intensidade como medida de densidade, acarreta em uma imprecisão na análise feita. Além disso, a inconclusão quanto ao seu estágio dinâmico e ao cenário de história evolutiva que levou o sistema ao seu estágio atual geram a necessidade de um estudo dedicado a esse aglomerado de galáxias de forma a determinar seu nível de relaxamento e possíveis colisões que estejam ocorrendo ou já tenham acontecido. Isso será feito no presente trabalho através da elaboração de mapas termodinâmicos usando a observação disponível para este aglomerado feita com o satélite Chandra. A metodologia empregada está descrita no capítulo 3, os resultados e sua análise está presente no capítulo 4 e as conclusões, no capítulo 5.

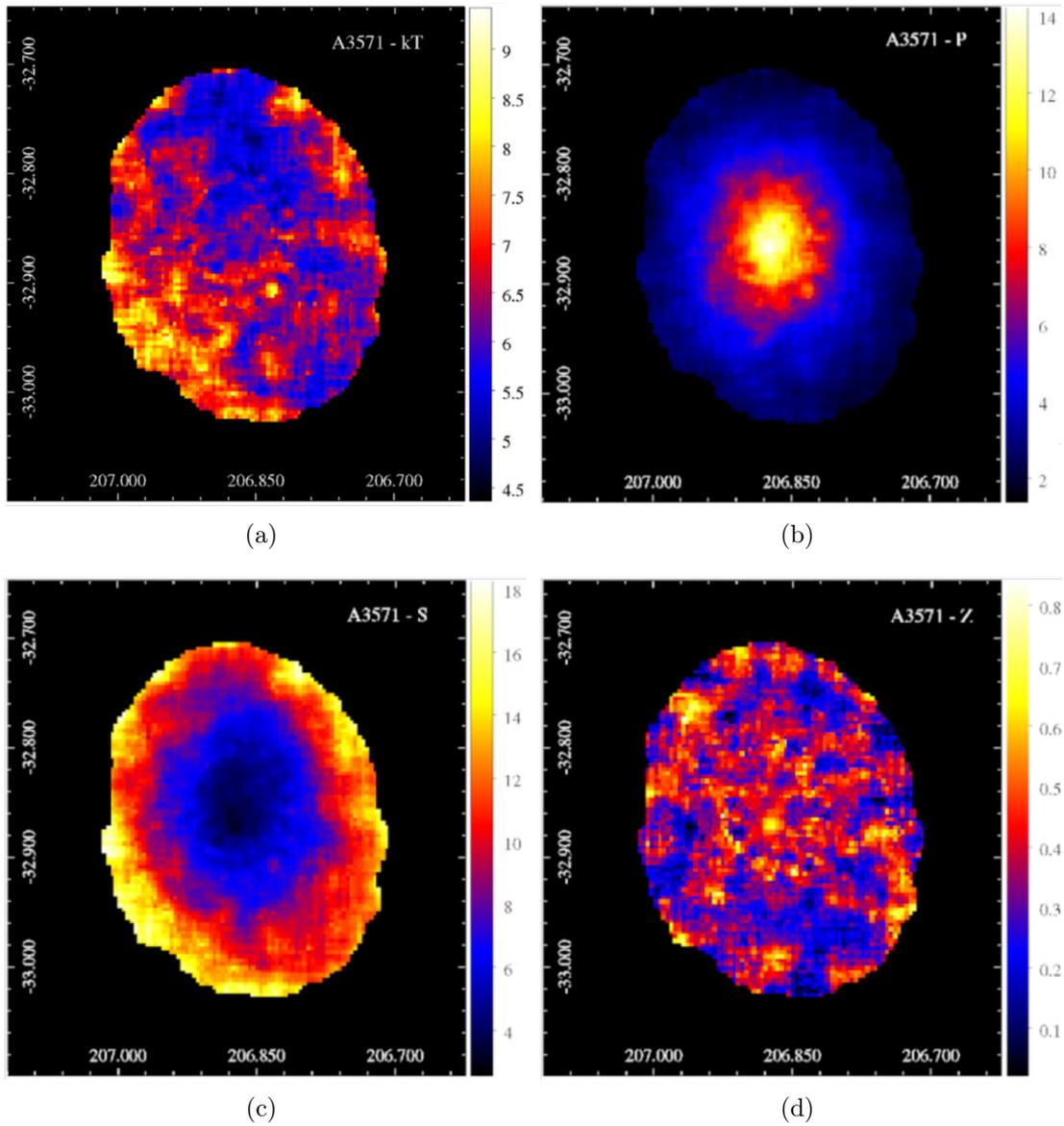


Figura 2.10: Mapas de temperatura (a), pseudo-pressão (b), pseudo-entropia (c) e metalicidade (d) elaborados por Laganá *et al.* (2019) através da observação feita pelo XMM-Newton. As unidades não foram definidas diretamente no texto.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Redução de dados

O processo de redução de dados e obtenção dos espectros e da imagem corrigida utilizou como principal programa o *Chandra Interactive Analysis of Observations* (CIAO)¹ na versão 4.16, além dos arquivos de calibração CALDB (*Chandra Calibration Database*) na versão 4.11.1.

A3571 tem uma observação pelo telescópio Chandra, sob o ObsId 4203, realizada em Julho de 2003 e disponibilizada publicamente em Agosto de 2004, conta com ~ 34 ks de exposição e foi feita com o instrumento ACIS-S. A redução de dados seguiu o procedimento padrão para fontes extensas descrito nos guias do CIAO², que serviram como guia para o processo de redução realizado neste trabalho. Esta se resume na correção da astrometria, remoção de fontes pontuais, filtragem de erupções solares (ou *flares*), obtenção do arquivo de emissão do plano de fundo e extração de espectros.

Erupção solar é uma emissão eletromagnética proveniente da atmosfera solar onde um campo magnético intenso acelera partículas carregadas, emitindo em diversas faixas do espectro eletromagnético. Elas podem vir acompanhadas da emissão dessas partículas carregadas – como elétrons, prótons e outros íons mais pesados – com energia da ordem de dezenas de keV a vários GeV.

Ao longo desta dissertação, foi adotado $H_0 = 70$ km/s/Mpc, $\Omega_M = 0,3$ e $\Omega_\Lambda = 0,7$.

3.1.1 Arquivos de nível 1 e 2

Os dados baixados de cada observação vêm separados em dois níveis, que se diferenciam pelo nível de processamento dos dados. Os de nível 1, contidos no diretório secundário, são produtos derivados de um único intervalo observacional, incluindo arquivos como efemérides, arquivos de *aspect solution* e arquivos de eventos. Efemérides

¹<https://cxc.cfa.harvard.edu/ciao/>.

²Disponíveis em <https://cxc.cfa.harvard.edu/ciao/threads/all.html>.

dizem respeito à posição de objetos astronômicos conhecido no céu, como o Sol e a Lua, enquanto que arquivos de *aspect solution* descrevem como o telescópio estava orientado durante a observação. Os arquivos de eventos são uma tabela em formato FITS onde estão listadas as detecções de fótons durante a observação, contendo informações como a posição, o tempo e a energia do fóton incidente.

Já os arquivos de nível 2, contidos no diretório primário, são mais processados, contendo os dados de todos os intervalos observados para aquele determinado ObsId, sendo feita a devida filtragem temporal – através de GTIs (*good time intervals*), que dizem quando um período aceitável da observação começou e terminou – e *status* do *bit*, identificando a presença de pixels defeituosos e raios cósmicos, por exemplo.

Há ainda outros níveis de processamento, como o 0 e o 3, sendo o primeiro arquivos de telemetria e o segundo catálogos e análises de um grande número de observações. Também há um nível intermediário, o 1.5, que contém dados da grade de difração que necessitam de calibrações adicionais. Porém, esses níveis não foram necessários para o presente trabalho, já que na observação utilizada as grades de difração não estavam ativas.

Como os arquivos de nível 2 baixados podem ter sido feitos com uma calibração antiga, faz-se necessário seu reprocessamento para que as calibrações mais recentes sejam aplicadas. Isso pode ser feito de forma simples através do comando *chandra_repro*, que fará todo o processo necessário automaticamente.

3.1.2 Correção da astrometria

O Chandra possui uma precisão angular de 0.4 segundo de arco ou melhor ao determinar a posição de objetos. Essa precisão pode ser aumentada através da correspondência entre as fontes presentes na imagem em raios X – detectadas com o comando *wavdetect* – e um catálogo externo com uma precisão maior. Neste trabalho, foi adotada a sugestão da *thread* e utilizado o catálogo USNO-A2.0, com precisão de ~ 0.20 segundo de arco (Assafin *et al.*, 2001).

Uma vez detectadas as fontes em raios X e obtido o recorte do catálogo externo na região da observação, calcula-se a transformação necessária para que o mesmo ponto em ambas detecções coincidam ou apresentem a menor distância, procedimento esse feito com o comando *wcs_match*. De posse da matriz de transformação, aplicamo-la ao arquivo de eventos e ao arquivo de *aspect solution* através do comando *wcs_update*.

3.1.3 Remoção de fontes pontuais e erupções solares

Observações em raios X podem ser afetadas por diversos fenômenos, que vão desde o plano de fundo cósmico em raios X (do inglês *cosmic X-ray background* ou CXB), presente em toda esfera celeste, até partículas carregadas vindas do Sol, originárias de explosões solares. Felizmente, a emissão em raios X proveniente do ICM de aglomerados de galáxias

são constantes no tempo (Elvis, 1976), facilitando a remoção de períodos de tempo onde *flares* sobressaem à essa emissão.

Como o ICM é caracterizado por um gás difuso, emissões em raios X pontuais do plano de fundo, ou mesmo do primeiro plano, podem ser facilmente identificadas e excluídas da observação. Essas fontes, que fazem parte do CXB, podem alterar parâmetros termodinâmicos do ICM, já que seus fótons não pertencem a este sistema. Praticamente, sua remoção pode ser feita selecionando uma determinada fonte com uma região circular ou em um formato que a melhor circunde, como uma elipse, e excluindo a região do arquivo de eventos através do comando *dmcoppy* com a opção *exclude* para as regiões selecionadas, fazendo com que a área onde uma vez estava a fonte pontual não apresente emissão alguma. Isso não afeta de forma significativa a análise do gás, já que as regiões removidas são pequenas e a falta de fótons não altera o espectro.

A detecção de erupções solares se dá pela curva de luz da observação do aglomerado, onde percebe-se intervalos de tempo em que a contagem de fótons por segundo supera a emissão proveniente do aglomerado por um fator de até 100. A remoção de intervalos de tempo que tenham comprometido uma parte significativa da observação³ se dá por meio da análise do histograma de contagens por segundo. Através do comando *deflare*, é feito uma média deste fluxo e somente um intervalo padrão de 3σ desse valor é utilizado, sendo o restante descartado. Durante nossa análise, 3σ não se mostrou um valor ideal, sendo adotado $2,5\sigma$ na redução. A Fig. 3.1 apresenta o gráfico da curva de luz com os valores removidos representados em azul e os remanescentes em verde, sendo o destaque vermelho a faixa de tempo excluída da observação. Após esse processo, o tempo de exposição resultante foi de $t_e \approx 26,3\text{ ks}$.

3.1.4 Arquivo de *background*

Devido à proximidade do aglomerado e ao campo de visão do CCD do Chandra ($8'$ por $8'$), não há na área observada região distante suficiente do centro do aglomerado para afirmarmos que não haja contribuição significativa do ICM. Neste caso, o R_{200} é da ordem de $R_{200} \sim 38,4'$ (Nevalainen *et al.*, 2001), valor bem maior que o lado do CCD. Assim, a utilização de uma área afastada como região de *background* é inviável. Para contornar esse problema, foi utilizado o *blanksky*.

Blanksky se refere à um arquivo de *background* criado a partir da sobreposição de várias observações em campos relativamente vazios com latitude galáctica alta ($|b| > 20^\circ$) e baixa emissão em raios X *soft*. Há varios arquivos de *blanksky* disponíveis nos arquivos de calibração, que não são incluídos por padrão no CIAO, devido ao seu tamanho, e

³Há uma seção da *thread* [Removing ACIS Background Flares](#) mostrando que, para *flares* muito intensos, o método mencionada não funciona, já que a média de contagens por segundo seria muito maior do que a emissão do aglomerado, excluindo-a durante o procedimento. Há a possibilidade e informar o valor da média desejado, mas o resultado ainda pode não ser satisfatório.

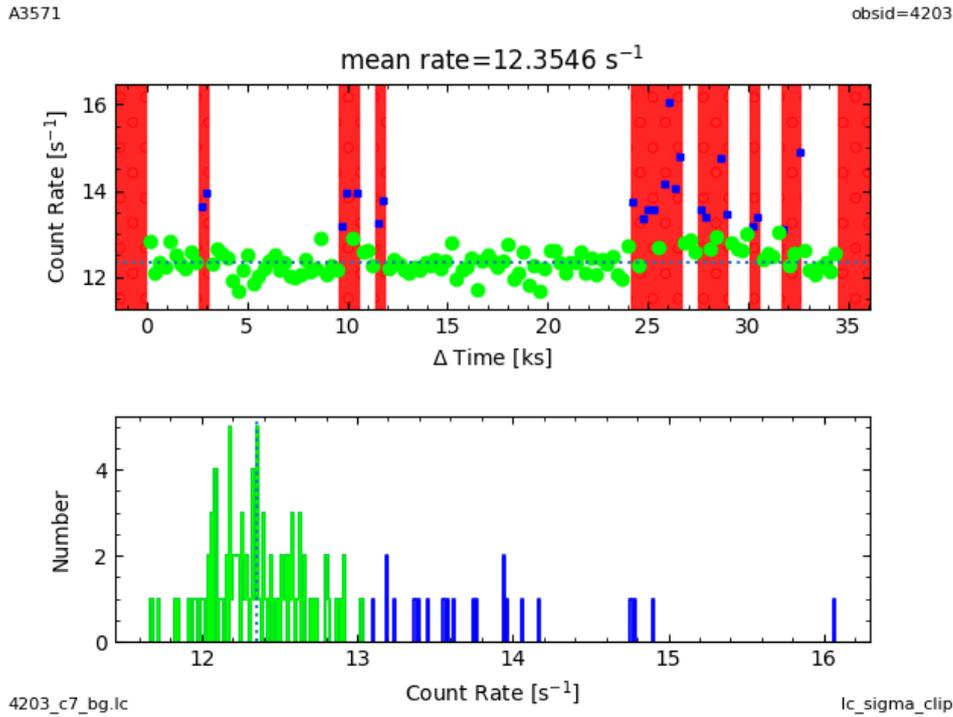


Figura 3.1: Em cima: curva de luz após a execução do comando *deflare*, com os pontos de *flare* removidos representados como pontos azuis e os remanescente, em verde. O intervalo de tempo removido, que corresponde aos pontos azuis, está destacado em vermelho. Em baixo: histograma do número de contagens por segundo, sendo verde o intervalo remanescente e azul o removido, onde foi usado um valor de sigma igual a 2,5.

precisam ser baixados separadamente.

Para a obtenção do *blanksky*, há o comando de mesmo nome integrado ao CIAO que é capaz de encontrar o arquivo correto a ser usado e reprojeta-lo para que esteja orientado de acordo com a observação utilizada. Porém, especificamente para a observação 4203, houve algum erro interno ao *software*, provavelmente ao calcular a escala de tempo de exposição, que impossibilitou seu uso. Felizmente, ao fazer o passo a passo informado no guia⁴ – o mesmo que seria feito pelo *script blanksky* – foi possível corrigir esse problema e prosseguir com a análise.

3.1.5 Extração de espectros

Como principal produto final da redução de dados, os modelos ajustados aos espectros são responsáveis pelos valores de temperatura, abundância, densidade, pressão e entropia ajustados e calculados para diferentes partes do ICM. De posse de todos os arquivos necessários – arquivo de eventos filtrado, arquivo de *background* e demais arquivos de nível 2 – é possível extrair espectros através de um único comando, que compila diversos outros: o *speextract*.

⁴Analysing the ACIS Background with the "Blank-Sky"Files, disponível em <https://cxc.cfa.harvard.edu/ciao/threads/acisbackground/>.

Como resultado, temos 5 arquivos por espectro extraído (utilizando o *blanksky*): espectro da fonte não agrupado, espectro da fonte agrupado (geralmente em 20 contagens por bin), espectro do *background*, ARF e RMF. ARF (do inglês, *Auxiliary Response File*) contém a área efetiva⁵ (veja a Fig. 3.2) e a eficiência quântica (fração de fótons incidentes que são registrados pelo detector) em função da energia média ao longo do tempo, sendo o ARF dado pelo produto dessas duas quantidades.

Já RMF (do inglês, *Redistribution Matrix File*) dá a probabilidade de medir uma determinada energia com função da energia do fóton incidente. Para detectores de alta resolução (como o HETG e o LETG), a matriz é praticamente diagonal, indicando que a energia medida é realmente a energia do fóton. Entretanto, para CCDs (como o ACIS), embora a matriz seja basicamente diagonal, há picos de escape e diferenças em baixas energias. Essa matriz pode ser calculada em terra, através de experimentos de calibração, sendo necessária somente sua adequação para as energias e posições da observação. Juntos, o ARF e o RMF compõem a resposta instrumental necessária para a extração do espectro.

Os comandos compilados pelo *speextract* são: *dmextract* (para extrair os espectros da fonte e do *background*); *sky2tdet*, *mkwarf* e *mkrmf* (para a criação dos arquivos de resposta); *dmgroup* (para agrupar os espectros); e *dmhedit* para atualizar as chaves BACKFILE, RESPFILE e ANCRFILE, ligando todos os arquivos. Detalhes de sua utilização podem ser conferidos no guia *Extract Spectrum and Response Files for an Extended Source*⁶. Há também a possibilidade de sua utilização para fontes pontuais, cujo tutorial está disponível em um guia similar do CIAO. Um exemplo de espectro para A3571 pode ser visto na Fig. 3.3, onde foi extraído o espectro de todo o chip ACIS-S3. Um modelo *phabs*apec* (descrito na seção seguinte) foi ajustado ao espectro, retornando uma temperatura $T = 7,23 \pm 0,07 \text{ keV}$ e uma abundância $Z = 0,42 \pm 0,02 Z_{\odot}$.

3.2 Ajuste espectral

De posse do arquivo de eventos final, após a redução de dados, podemos realizar os ajustes espectrais para a obtenção de parâmetros como temperatura, metalicidade e normalização (quantidade relacionada à densidade de bárions). Para realizar o ajuste aos espectros, o *software* adotado foi o Xspec⁷, sendo 12.14.0h a versão utilizada neste trabalho. Os modelos adotados foram dois, *phabs* e *apec*.

O modelo *phabs* é responsável por compensar a absorção fotoelétrica devido à coluna de Hidrogênio entre nós e a fonte observada. O valor adotado foi $n_H = 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, retirado da ferramenta disponibilizada pelo HEASARC (do inglês, *High Energy Astrophysics*

⁵A área efetiva do instrumento de imageamento pode ser afetada por diversos fatores, como refletividade (que depende da energia), vinheta fora do eixo, eficiência quântica do detector (que depende da posição no detector e da energia do fóton, etc.

⁶Disponível em: <https://cxc.cfa.harvard.edu/ciao/threads/extended/>.

⁷<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>.

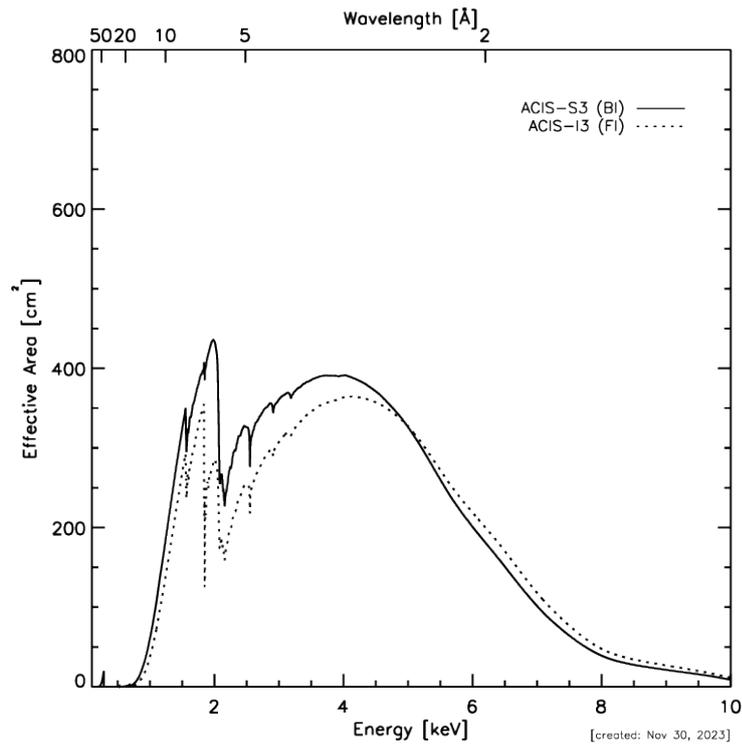


Figura 3.2: Área efetiva em função da energia em escala linear para o instrumento ACIS. A linha pontilhada se refere para o chip I3, enquanto que a sólida representa a área efetiva para o chip S3. Disponível em: <<https://cxc.cfa.harvard.edu/proposer/POG/html/chap6.html>>

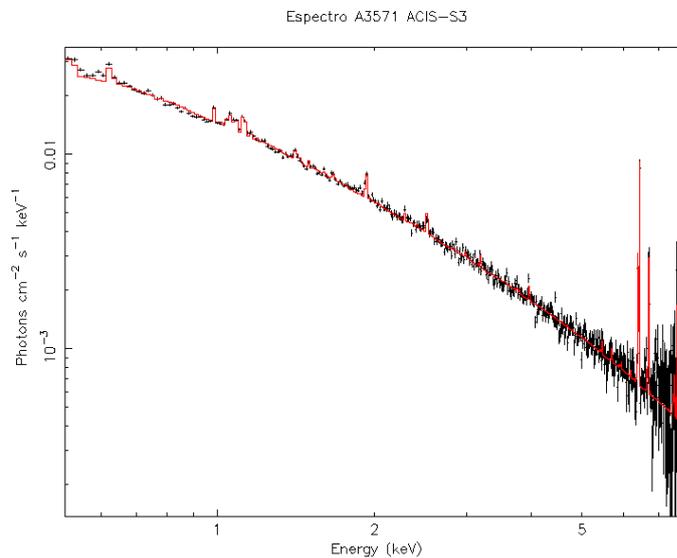


Figura 3.3: Espectro extraído para A3571 considerando todo o chip ACIS-S3 com 30 canais por bin. A linha sólida em vermelho representa um modelo *phabs*apec* ajustado ao espectro.

Science Archive Research Center) especificamente para este fim⁸.

⁸A ferramenta está disponível em: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/w3nh/w3nh.pl>.

Já o modelo *apec* é o responsável por ajustar um contínuo de *Bremsstrahlung* e determinar a abundância do gás através de um ajuste de linhas de emissão em raios X. As abundâncias são determinadas de acordo com o banco de dados atômico [AtomDB](#), cuja versão padrão (v3.0.9) foi adotada durante as análises deste trabalho. É através deste modelo que as quantidades físicas pertinentes podem ser ajustadas e calculadas.

Neste modelo, há quatro parâmetros a serem ajustados: temperatura, abundância, *redshift* e normalização. O *redshift*, no entanto, foi fixado no valor nominal do aglomerado ($z = 0.039$), enquanto que os demais parâmetros foram deixados livres. A faixa de energia adotada durante os ajustes foi de 0,5 – 8,0 keV, tendo sido ignorados os pixels defeituosos determinados durante a redução.

O cálculo da densidade e, conseqüentemente, da pressão e da entropia, que dependem da primeira (veja equações 3.2 e 3.3), foi feito através da relação disponibilizada na própria página do Xspec, que pode ser conferida na equação 3.1.

$$\text{norm} = \frac{10^{-14}}{4\pi[D_A(1+z)]^2} \int n_e n_H dV \quad (3.1)$$

onde D_A é a distância de diâmetro angular do aglomerado, definida neste caso como $D_A = 159,3 \text{ Mpc} \approx 4,9 \times 10^{26} \text{ cm}$; e n_e e n_H são a densidade de elétrons e Hidrogênio em cm^{-3} , respectivamente. O cálculo da densidade é feito resolvendo a relação acima para n , considerando que as densidades de elétrons e hidrogênio são iguais e $n_e n_H = n^2$. A pressão e a entropia foram calculadas, respectivamente, de acordo com

$$P = nkT \quad (3.2)$$

$$S = kTn^{-2/3} \quad (3.3)$$

Para cada um dos parâmetros, os erros foram calculados dentro de 1σ e a propagação dos erros para a densidade δ_n , pressão δ_P e entropia δ_S levaram à

$$\delta_n = \left| \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\pi 10^{14} [D_A(1+z)]^2}{V}} \frac{1}{\sqrt{\text{norm}}} \delta_{\text{norm}} \right| \quad (3.4)$$

$$\delta_P^2 = (T\delta_n)^2 + (n\delta_T)^2 \quad (3.5)$$

$$\delta_S^2 = \left(-\frac{2}{3} n^{-5/3} T \delta_n \right)^2 + (n^{-2/3} \delta_T)^2 \quad (3.6)$$

Tendo em vista que o Xspec produz valores assimétricos para os erros de cada parâmetro ajustado, foi realizada a simetrização dos erros para a temperatura e normalização, a fim de aplicá-los às equações acima. Isso foi feito segundo

$$\delta = \frac{|\delta_+ + \delta_-|}{2} \quad (3.7)$$

onde δ_+ e δ_- são os erros limite superior e inferior obtidos pelo Xspec.

3.3 Mapas de temperatura, pressão e entropia

3.3.1 Código para criar as regiões

Para se fazer a suavização adaptativa através do método *Kriging* (ver seção 3.3.2), precisamos de um conjunto de pontos e os respectivos valores de temperatura, pressão e entropia na região de interesse. De forma semelhante ao que foi feito em Jiménez-Teja *et al.* (2023), onde regiões circulares com pelo menos 3000 contagens foram feitas por todo o aglomerado, neste trabalho foram feitas regiões quadradas distribuídas por toda a região do aglomerado disponível, limitada pelo tamanho do CCD, dado o tamanho angular do aglomerado, devido à sua distância. O código para a geração das regiões será descrito a seguir.

As regiões do mapa são delimitadas por um retângulo, denominado borda do mapa, cuja definição é importante nesse processo, pois, além de definir os limites do mapa, definirá o ângulo de inclinação de todos os quadrados. O tamanho de cada um deles será definido pelo número de contagens desejado. Através do comando do CIAO *dmextract*, o código calcula o número de contagens, subtraindo a emissão do plano de fundo, e ajusta dinamicamente o tamanho do lado do quadrado, modificando sua área e adequando a quantidade de dados de acordo com o valor pré-definido. Vale ressaltar que, ao modificar os lados do quadrado, seu centro permanece à mesma altura (mesma coordenada Y) em relação ao limite inferior da borda e seu lado esquerdo na mesma coordenada X. Esse ajuste ocorre até que o número de contagens fique suficientemente próximo ao desejado.

Depois que cada quadrado do mapa é definido, o código passa para o próximo, percorrendo uma linha horizontal (com relação à borda) e, chegando no limite da borda do mapa, passa-se para a linha superior, cuja altura é definida de acordo com o menor lado da linha anterior. As linhas serão feitas até que a borda superior do mapa seja alcançada. O resultado final é a região de interesse preenchida com regiões quadradas que são maiores onde a emissão é menor e vice-versa. Um exemplo pode ser visto na Fig. 3.4.

3.3.2 O método *Kriging*

Para a confecção dos mapas, os valores ajustados para temperatura e demais grandezas serão associados aos pontos centrais de cada um dos respectivos quadrados dos quais os dados foram extraídos. Com isso, será necessário realizar uma interpolação para encontrar os valores entre esses pontos. O método escolhido para isso foi o *Kriging*, técnica nomeada

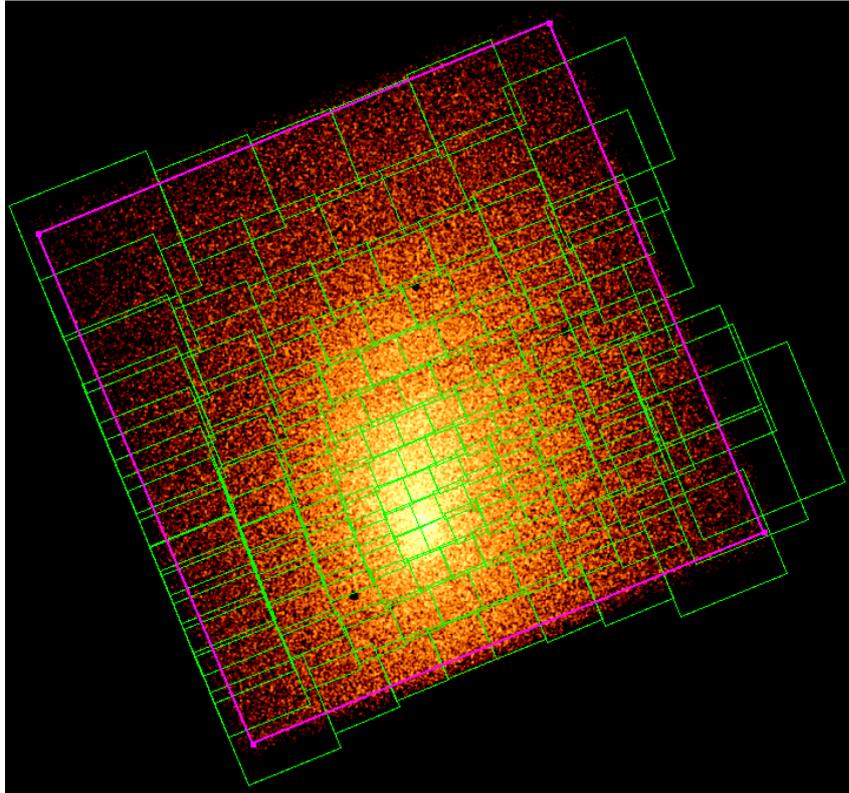


Figura 3.4: Regiões criadas para a elaboração dos mapas. A borda para a criação das regiões está em magenta e cada um dos quadrados em verde contém 3000 contagens. Ao fundo, temos a imagem do aglomerado.

em homenagem ao engenheiro de minas Danie Krige que, embora tenha originado no campo da geologia mineira, se mostrou eficaz ao produzir mapas de ICM de aglomerados (Jiménez-Teja *et al.*, 2023).

Contrário à extrapolação, onde os pontos obtidos estão além dos dados, interpolação é o processo de obter valores intermediários para uma série de termos particulares dados (Sheppard, 1911). Isso pode ser feito de várias formas, modificando-se a função que descreve os pontos, como mostrado na Fig. 3.5. Neste processo, a função ajustada deve necessariamente passar pelos pontos de dados, sendo que na interpolação linear, que é o caso mais simples, os pontos serão simplesmente ligados por segmentos de retas.

O *Kriging* em si é um processo de duas etapas onde, primeiramente, um modelo de variância (função que irá descrever os dados) é ajustado à semivariância γ . Considere que temos n medidas dadas por $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ tomadas nas posições x_1, x_2, \dots, x_n . A semivariância é dada por Pignalberi (2019):

$$\gamma(h_i) = \frac{1}{2} [z(x_i) - z(x'_i)]^2 \quad (3.8)$$

onde $h_i = |x_i - x'_i|$ é a distância entre cada par de pontos. O variograma experimental é um gráfico da distância h_i pela semivariância ($\gamma(h_i)$). Já os pesos são determinados segundo a expressão

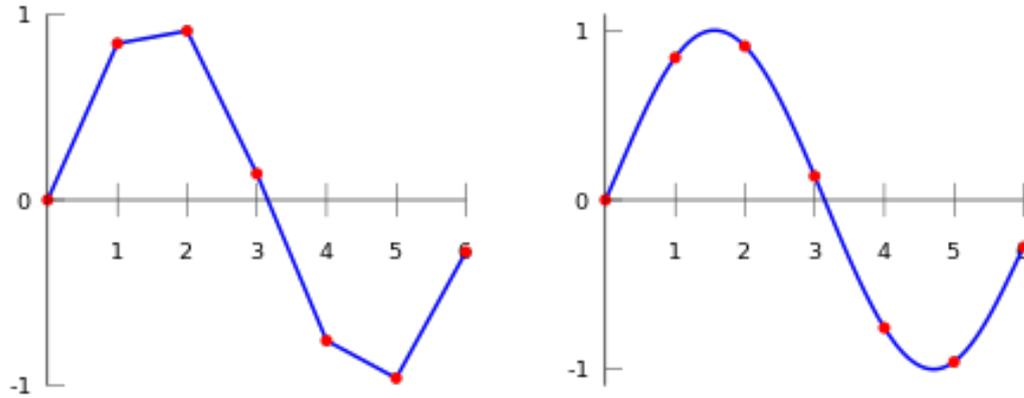


Figura 3.5: Ambas as figuras mostram uma interpolação entre os pontos de dados, porém na esquerda foi aplicada uma função linear e na direita uma função polinomial. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Interpolation>.

$$\hat{z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (3.9)$$

onde \hat{z}_0 é o valor estimado pelo *Kriging* e os coeficientes λ_i são os pesos calculados para essa determinada posição, de forma que $\sum_{i=0}^n \lambda_i = 1$. Os pesos e a semivariância estão relacionados de acordo com (Wackernagel, 2003)

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_j - x_i) + \mu = \gamma(x_j - x_0) \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad (3.10)$$

sendo μ o parâmetro de Lagrange.

Uma discussão mais detalhada sobre este método pode ser conferida em, e.g., Pignatelli (2019) ou Matheron (1963). Para aplicá-lo aos dados e fazer o *adaptive smoothing* aos mapas foi usado o pacote Python PyKrige⁹.

3.4 Perfis radiais e cálculo da massa

Há três principais maneiras de se calcular a massa de um aglomerado de galáxias: através do Teorema do Virial, pela dispersão de velocidades, como feito por Zwicky (1933); por raios X, através da equação de equilíbrio hidrostático; e por meio de lentes gravitacionais, ao se observar a distorção causada pela massa integrada na linha de visada. Cada um dos métodos possui suas vantagens e desvantagens.

O primeiro método de se calcular a massa depende da quantidade de galáxias do aglomerado, a qualidade da medição de suas velocidades e da seleção das galáxias pertencentes ao aglomerado, podendo ocorrer contaminações na amostra devido à má seleção

⁹A página deste pacote pode ser acessada através do link <https://geostat-framework.readthedocs.io/projects/pykrige/en/stable/contents.html>.

das galáxias. O segundo método, assim como o primeiro, depende do estágio dinâmico do aglomerado, havendo a necessidade que este esteja virializado. Já o terceiro método, apesar de medir a massa mesmo em sistemas que não estejam em equilíbrio, não é capaz de distinguir o aglomerado de estruturas que estejam no primeiro plano ou no plano de fundo, medindo toda a massa projetada na linha de visada. O método escolhido por nós foi o segundo.

A equação do equilíbrio hidrostático é definida como:

$$-\frac{\nabla P}{\rho} + g = 0 \quad (3.11)$$

onde P é a pressão do gás, ρ é sua densidade e g a aceleração da gravidade. Da equação do gás ideal, temos

$$P = NkT = \frac{k}{\mu m_p} \rho T \quad (3.12)$$

onde foi usado que $N = \rho/\mu m_p$, sendo k a constante de Boltzmann e μ o peso molecular médio.

Sendo $\nabla P = dP/dr$, temos

$$\nabla P = \frac{dP}{dr} = \frac{k}{\mu m_p} \left(\rho \frac{dT}{dr} + T \frac{d\rho}{dr} \right) \quad (3.13)$$

Além disso, podemos definir g como sendo

$$g = -\frac{GM}{r^2} \quad (3.14)$$

Substituindo 3.13 e 3.14 em 3.11, temos

$$-\frac{1}{\rho} \frac{k}{\mu m_p} \left(\rho \frac{dT}{dr} + T \frac{d\rho}{dr} \right) + \frac{GM}{r^2} = 0 \quad (3.15)$$

$$-\frac{kT}{\mu m_p} \left(\frac{1}{T} \frac{dT}{dr} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dr} \right) - \frac{GM}{r^2} \quad (3.16)$$

Resolvendo para M, ficamos com

$$M = -\frac{kTr}{\mu m_p G} \left(\frac{r}{T} \frac{dT}{dr} + \frac{r}{\rho} \frac{d\rho}{dr} \right) \quad (3.17)$$

$$M = -\frac{kTr}{\mu m_p G} \left(\frac{r}{dr} \frac{dT}{T} + \frac{r}{dr} \frac{d\rho}{\rho} \right) \quad (3.18)$$

De forma geral, considerando uma variável x , temos

$$\frac{d}{dx} \ln x = \frac{1}{x} \quad (3.19)$$

$$d \ln x = \frac{dx}{x} \quad (3.20)$$

De forma análoga, podemos usar a equação 3.20 para substituir os valores entre parênteses na equação 3.18, ficando

$$M(\leq r) = -\frac{kTr}{\mu m_p G} \left(\frac{d \ln T}{d \ln r} + \frac{d \ln \rho}{d \ln r} \right) \quad (3.21)$$

Considerando $\frac{d \ln T}{d \ln r} \approx 0$, ficamos com

$$M(\leq r) = -\frac{kTr}{\mu m_p G} \frac{d \ln \rho}{d \ln r} \quad (3.22)$$

Amplamente utilizado, o modelo- β (apresentada inicialmente em 1.7 e, novamente, abaixo) tem a vantagem de ser simples ao descrever o perfil radial de densidade de um aglomerado. Para um determinado valor de raio, a densidade é definida em função da densidade central n_0 , o raio do núcleo r_c e um parâmetro de inclinação β de acordo com a função a seguir (:

$$n(r) = n_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]^{-3\beta/2} \quad (3.23)$$

Ao definir esse modelo para descrever a densidade do gás, podemos calcular $\frac{d \ln \rho}{d \ln r}$. $\ln \rho$ será

$$\ln \rho = \ln \rho_0 - \frac{3}{2} \beta \ln \left[1 + e^{2(\ln r - \ln r_c)} \right] \quad (3.24)$$

Assim,

$$\frac{d \ln \rho}{d \ln r} = -3\beta \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-1} \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \quad (3.25)$$

Substituindo 3.25 em 3.23 e considerando que a temperatura é constante por todo o sistema, encontramos para a equação da massa

$$M(< r) = \frac{3\beta kTr}{\mu m_p G} \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-1} \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \quad (3.26)$$

Como o cálculo da massa é limitado pelo valor raio escolhido, devemos calcular também valores como R_{200} e R_{500} . Esses raios representam, respectivamente, a distância ao centro do aglomerado onde a densidade é 200 e 500 vezes a densidade crítica do universo, que é definida como $n_c = (2,482 \pm 0,032) \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$ (Olive, 2014). Esse valor pode ser calculado resolvendo a equação 3.23 para r e fazendo $n = n_c * 200$, no caso de R_{200} , por exemplo. O modelo- β foi ajustado ao perfil radial de densidade, cuja construção será detalhada a

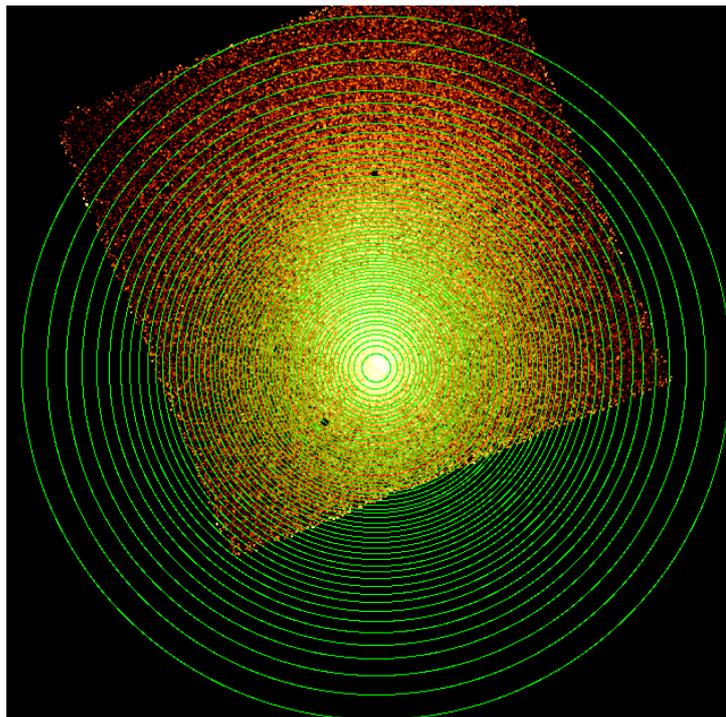


Figura 3.6: Região anular com 5000 contagens por anel utilizada para ajuste espectral e criação de perfis radiais.

seguir.

Para a construção dos perfis radiais foram feitas regiões anulares com número fixo de contagens. Por meio de um código em Python, a espessura de cada anel foi dinamicamente ajustada até que o número líquido de contagens (subtraindo-se o *background*) estivesse dentro de 5000 ± 10 contagens. As regiões foram feitas até o limite radial em que ainda haviam a quantidade de contagens alvo. Todos os anéis estão centrados no pico de emissão em raios X de A3571, definido como o ponto de fluxo mais intenso na imagem em raios X corrigida pela exposição e suavizada no DS9 com um modelo gaussiano com raio igual a 3 e sigma igual a 1,5 ($13^h 47^m 28^s, 0, -32^\circ 52^m 01^s, 9$, J2000). As regiões criadas podem ser vista na Fig. 3.6.

3.5 Análise de imagens

3.5.1 Imagem corrigida

O arquivo de eventos contém a listagem dos fótons, com suas respectivas energias, tempo de detecção e posição no detector, informações cruciais para as análises mencionadas até aqui. Entretanto, podem aparecer falhas no CCD utilizado devido a, por exemplo, um pixel danificado, e, portanto, a imagem observada diretamente através deste arquivo não representa a imagem em raios X real da fonte. Para compensar esse efeito, criamos um mapa de exposição, que relaciona a posição do céu com a área efetiva do detector, e

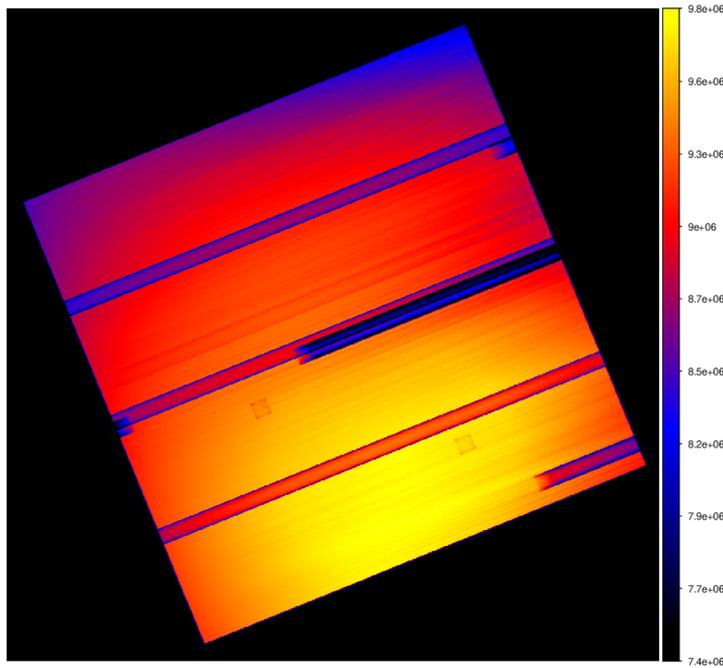


Figura 3.7: Mapa de exposição para a observação do Chandra do A3571 (ObsId 4203) no chip S3 em unidades de $[cm^2 s \text{ contagens/fóton}]$.

corrigimos a intensidade do fluxo detectado de acordo com a eficiência de cada pixel. Um exemplo de mapa de exposição pode ser conferido na Fig. 3.7.

O procedimento para a criação da imagem corrigida pode ser feito automaticamente através do comando *fluximage* do CIAO, porém há a possibilidade de realizar os passos necessários um a um. A primeira etapa consiste em transformar o arquivo de eventos em imagem através do comando *dmcoppy*, onde podemos especificar quais CCDs vão ser utilizados e a binagem adotada, dentre outros possíveis filtros, como uma região específica do céu, por exemplo.

O mapa de exposição foi criado a partir dos arquivos de *aspect solution* (que relaciona a posição do detector com as coordenadas celestes) e mapa instrumental (área efetiva em função da posição no detector). Em seguida, a imagem gerada a partir do arquivo de eventos será normalizada de acordo com esse mapa, sendo o valor de cada pixel dividido pelo valor correspondente no mapa de exposição. A imagem resultante pode ser conferida na Fig. 3.8.

3.5.2 Ajuste do modelo- β 2D

Com o intuito de se observar melhor as estruturas e excessos presentes na emissão em raios X do aglomerado, foi ajustado um modelo- β bidimensional à imagem gerada a partir do arquivo de eventos. A imagem foi subtraída do modelo com os parâmetros que melhor descreveram a emissão, ficando somente o resíduo. Portanto, o resíduo indicará as regiões onde há excesso ou falta de emissão de acordo com o melhor modelo ajustado.

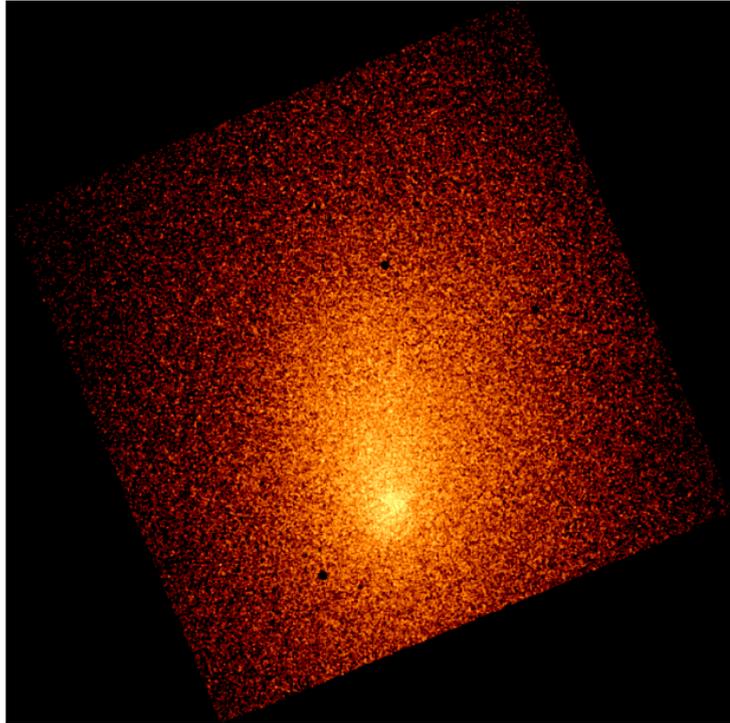


Figura 3.8: Imagem em raios X do aglomerado A3571 corrigida pela exposição do *chip* ACIS-S3.

Isso foi feito através do Sherpa¹⁰, pacote de modelagem e ajuste do CIAO. Foi adotado o procedimento padrão descrito na *thread* [Fitting FITS Image Data](#), sendo Levenberg-Marquardt (Moré, 1978) o método de otimização utilizado por este se assemelhar mais ao método padrão do Xspec.

¹⁰<https://cxc.cfa.harvard.edu/sherpa/>

Capítulo 4

Análises e resultados

4.1 Análise do estágio dinâmico

Os mapas de temperatura, pressão e entropia podem ser vistos na Fig. 4.1. A distribuição desses parâmetros termodinâmicos é consistente, em geral, dentro das escalas espaciais coincidentes, com o comportamento mostrado pelos mapas feitos por Laganá *et al.* (2019), os quais são mostrados na Fig. 4.2. Nesta figura, os mesmos contornos de brilho superficial obtidos pela análise com os dados do Chandra foram sobrepostos ao mapa.

Nos mapas elaborados por Laganá *et al.* (2019), infere-se pelos valores da escala do mapa em Fig. 4.2(a) que a temperatura é dada em keV . Os valores de pseudo-pressão P e pseudo-entropia S são dados por $P \propto kT \times I^{1/2}$, onde I é a intensidade em contagens por segundo, e $S \propto kT/I^{1/3}$, respectivamente (Laganá *et al.*, 2019). Ao calcular esses valores, os autores consideram que a emissão em raios X do ICM é proporcional a $I \propto n^2$, onde n é a densidade. Entretanto, como visto em §1.2.1, há uma dependência com a temperatura na emissão que, ao ser levada em consideração, faz com que os termos $T^{3/4}$ e $T^{5/6}$ apareçam, respectivamente, nas relações da pressão e da entropia, resultando em $P \propto kT \times (I^{1/2}T^{3/4})$ e $S \propto kT/(I^{1/3}T^{5/6})$.

Comparando diretamente as temperaturas obtidas nesta dissertação com as obtidas por Laganá *et al.* (2019), percebemos que estas últimas são, em geral, menores do que as obtidas através da observação do Chandra. Esse comportamento também foi notado por Bonamente e Nevalainen (2011) ao analisarem o aglomerado de galáxias AS1101 com Chandra, XMM-Newton e ROSAT. Os autores observaram que, ao usar uma banda larga de energia (0,7 - 7,0 keV), as temperaturas obtidas pelo Chandra eram, em geral, maiores em relação às obtidas pelo XMM-Newton, mas essa diferença não foi observada ao ajustar os dados apenas aos raios X duros (2,0 - 7,0 keV). Segundo Markevitch (2002), esse comportamento observado é causado pela *Point-Spread Function* (PSF) do XMM-Newton, que espalha os fótons mais energéticos da região central para regiões exteriores, remo-

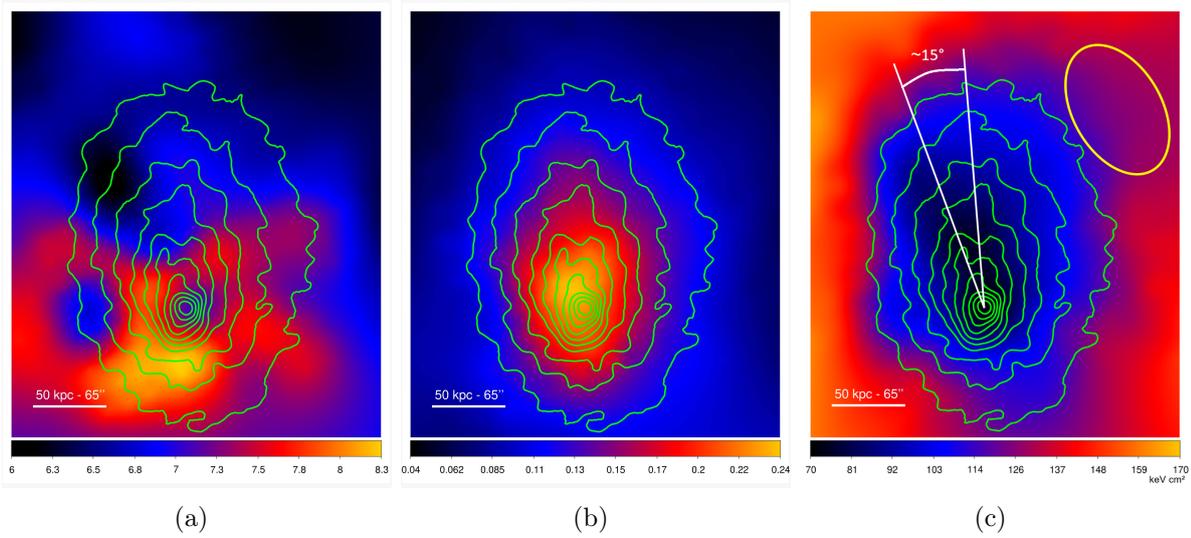


Figura 4.1: Mapas de temperatura (a), pressão (b) e entropia (c) suavizados através do método Kriging, onde foi adotado 3000 contagens em cada célula. As unidades de cada um dos mapas são, respectivamente, $[keV]$, $[keV cm^{-3}]$ e $[keV cm^2]$. Os isocontornos em verde representam o brilho superficial em escala linear. No mapa de entropia, o contorno em amarelo identifica a região de baixa entropia também observada nos mapas de [Hudaverdi *et al.* \(2005\)](#) e [Laganá *et al.* \(2019\)](#).

vido artificialmente os fótons quentes do centro, resultando na redução da temperatura ajustada.

Através dos mapas da Fig. 4.1, pode-se verificar que a $25 kpc$ ao sul do centro do aglomerado (definido como o pico de emissão em raios X), coincidente com a posição da descontinuidade de brilho superficial visível na imagem em raios X (Fig. 3.8, por exemplo), a temperatura aumenta de $\sim 7 keV$ para $\sim 8 keV$ ao comparar a região interior à descontinuidade com a exterior. A pressão, no entanto, é constante dentro das barras de erro ($\sim 0,20 \pm 0,02 keV cm^{-3}$) através da frente. Para analisar as características dessa frente mais cuidadosamente, foi feito um perfil radial de temperatura e pressão, além do brilho superficial, desde o centro de raios X até 130 segundos de arco ao sul.

A descontinuidade em questão tem forma aproximada a um arco circular, como é esperado tanto de frentes frias quanto de frentes de choque ([Markevitch e Vikhlinin, 2007](#)), sendo o excesso de brilho superficial confirmado pelo perfil radial da Fig. 4.3(b). Além da descontinuidade observada em ~ 30 segundos de arco ao sul da BCG, nota-se várias outras aparentes estruturas, porém não há resolução espectral suficiente para que estas sejam investigadas. Ao analisar o comportamento da temperatura e da pressão em ~ 30 segundos de arco do centro, observa-se que há um aumento de temperatura exterior à frente, enquanto que a pressão permanece constante durante esta descontinuidade, indicando que se trata de uma frente fria. O salto de densidade observado através da frente é $r = \frac{\rho_1}{\rho_0} \approx 0,7$, onde os subíndices 1 e 0 indicam as regiões exteriores (mais afastadas do centro) e interiores (mais próximas ao centro) à frente. O salto de temperatura observado

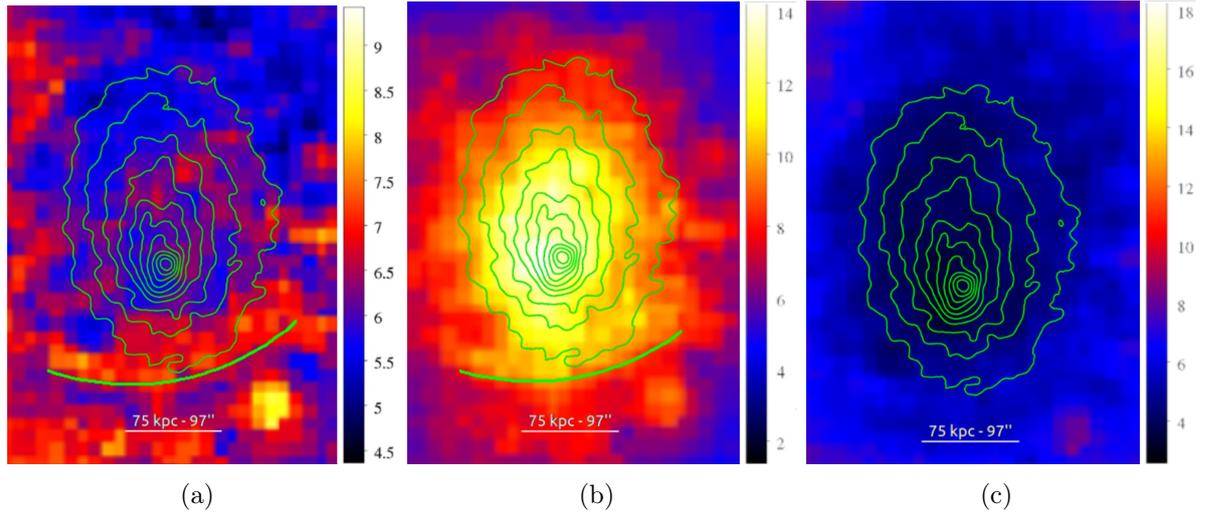


Figura 4.2: Mapas de temperatura (a), pseudo-pressão (b) e pseudo-entropia (c) apresentados em Laganá *et al.* (2019) utilizando dados do XMM-Newton. Os contornos em verde são os mesmo da Fig. 4.1. A curva em verde representa uma possível frente de choque. Dado o campo de visão maior do XMM-Newton em comparação com o Chandra, foi feito um recorte no mapa original apresentado em Laganá *et al.* (2019) para melhor visualização.

também é significativo, de $6,7 \pm 0,7 \text{ keV}$ para $8,6_{-0,9}^{+1,1} \text{ keV}$. A diferença entre os valores dos parâmetros termodinâmicos nos mapas e nos perfis se dá pelo formato da região utilizada. Enquanto o mapa foi feito para representar os valores de acordo com a posição na imagem, os perfis radiais foram elaborados com regiões anulares justamente para se ter uma noção melhor de como esses valores variam com a distância.

A presença da frente fria pode ser um indicativo de uma fusão maior, com possíveis frentes de choque mais ao sul como observado no *Bullet Cluster* (Markevitch *et al.*, 2002). Entretanto, a região ao sul após 130 segundos de arco do centro foi coberta pelo CCD S2 do ACIS. Os CCDs com iluminação frontal foram afetados por prótons “moles” no início da operação do Chandra, degradando esses detectores e diminuindo sua eficácia de detecção. Os CCDs com iluminação traseira não foram degradados de forma significativa. Embora os procedimentos de operação tenham sido modificados, somente o CCD ACIS-S3 e os chips ACIS-I são considerados cientificamente úteis para esse tipo de análise (O’Dell *et al.*, 2003).

Um indicativo que aponta para a hipótese de uma fusão maior está nos mapas de pressão e temperatura de Laganá *et al.* (2019), onde é possível notar um aumento simultâneo na temperatura e na pressão em uma região 85 kpc ao sul do centro do aglomerado (veja Fig. 4.2). Embora haja uma aparente simetria circular na região, não foi possível observar uma frente clara na imagem em raios X proveniente do XMM-Newton, não havendo, portanto, um aumento de brilho superficial evidente na imagem feita com este satélite relacionado a essa frente. Um dos possíveis motivos para isso é o valor da PSF

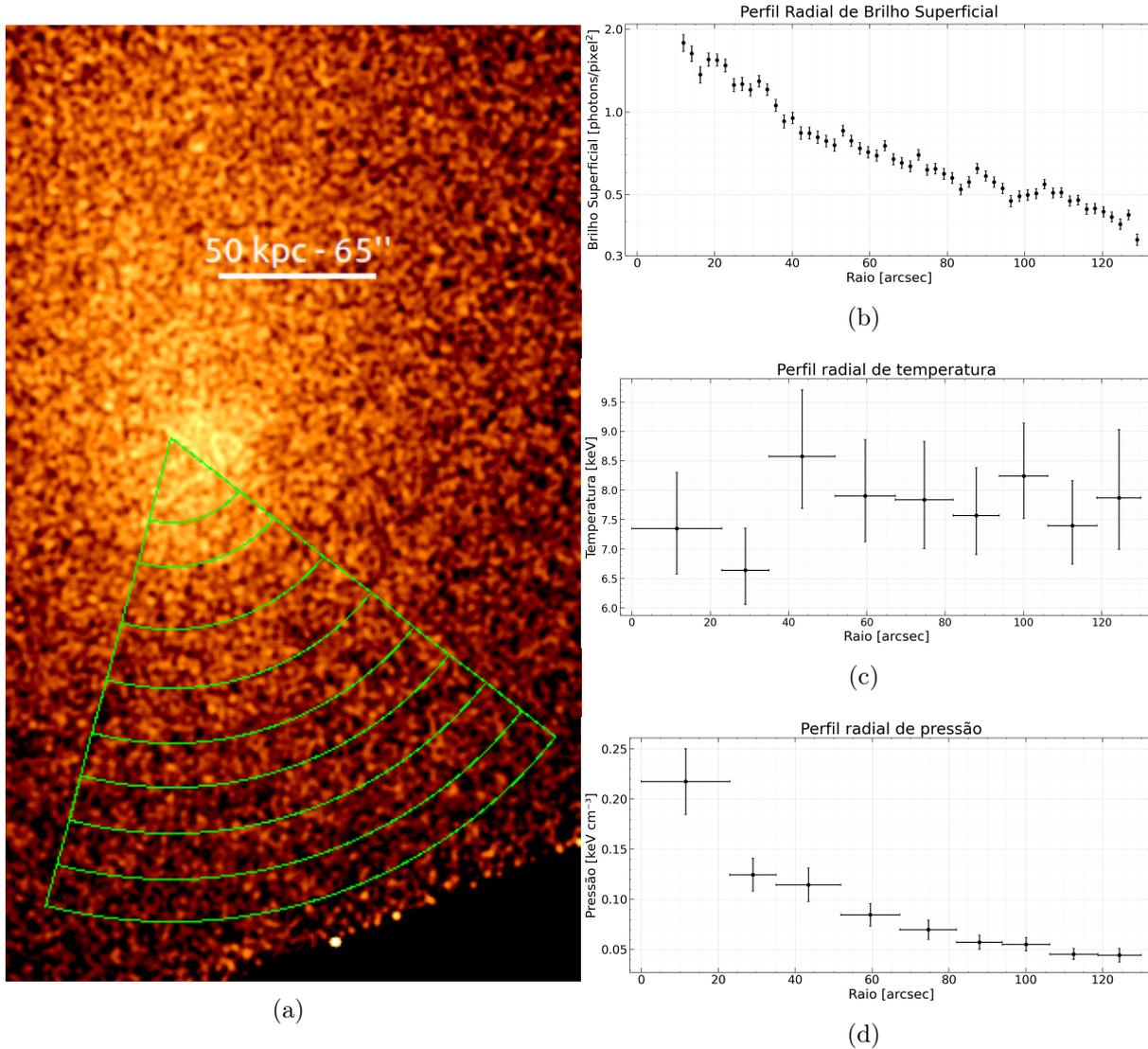


Figura 4.3: Resultados obtidos para a frente fria ao Sul do núcleo do aglomerado. (a) imagem em raios X do aglomerado suavizada, com as regiões utilizadas na elaboração dos perfis de temperatura e pressão. O centro e o ângulo das regiões foram determinados de forma a coincidir o segundo menor arco com a forma da descontinuidade; (b) perfil radial de brilho superficial, onde pode-se ver o excesso de brilho em ~ 30 segundos de arco; (c) o perfil radial de temperatura mostra um salto significativo na região da descontinuidade, de $6,6 \text{ keV}$ para $8,6 \text{ keV}$; (d) no perfil radial de pressão pode-se notar seu comportamento contínuo quando comparamos a região interior e exterior à frente observada, $P \approx 0,12 \text{ keV cm}^{-3}$.

dos instrumentos EPIC que, para uma distância angular de ~ 2 minutos de arco do eixo da observação e uma fonte pontual com temperatura 9 keV , 90% da energia total estará dentro de um círculo de ~ 55 segundos de arco de raio, considerando o instrumento PN (veja Fig. 4.4). Como resultado, a diluição do sinal devido à PSF pode mascarar uma possível descontinuidade, dificultando a detecção de estruturas como frentes de choque.

Pelo perfil de brilho superficial do Chandra, percebe-se outras descontinuidades próximas a 90 e 105 segundo de arco do centro, cuja posição coincide com a posição do

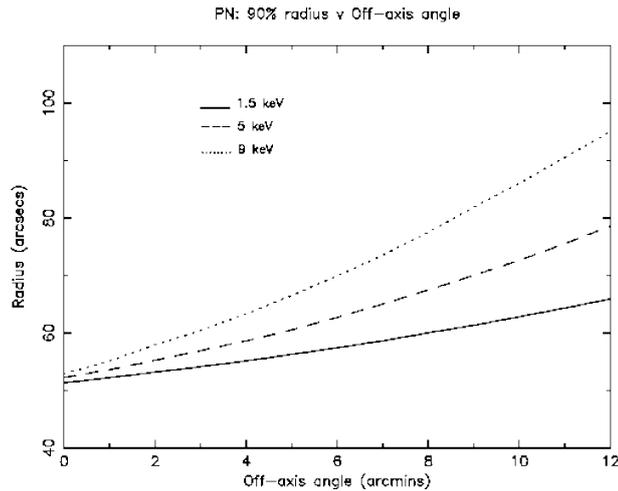


Figura 4.4: Raio que conterá 90% da energia total de uma fonte pontual observada com a câmera PN como uma função do ângulo fora do eixo em três energias.

aumento de temperatura e pressão vistos nos mapas de [Laganá et al. \(2019\)](#). Entretanto, como mencionado anteriormente, não há resolução espectral suficiente para caracterizar essa frente pelos dados disponíveis do Chandra.

A diferença de $\sim 15^\circ$ entre a direção de alongação do brilho superficial e da entropia na parte central, bem como o fato de o ponto de pressão máxima não coincidir com o pico de luminosidade do aglomerado (deslocamento de ~ 15 kpc), são evidências adicionais que sugerem que uma fusão de pelo menos dois aglomerados está acontecendo.

Com o objetivo de observar mais claramente as estruturas presentes nesta observação, foi realizado um ajuste de um modelo- β bidimensional. O centroide desse ajuste ($13^h47^m28^s,0$, $-32^\circ52^m01^s,9$, J2000) foi determinado pelo pico de emissão em raios X de A3571, definido como o ponto de fluxo mais intenso na imagem corrigida pela exposição e suavizada no DS9 com um modelo gaussiano com raio igual a 3 pixels e σ igual a 1,5. Os parâmetros que melhor se ajustaram ao modelo foram $r_c = 117''$, $\beta = 0,74$, excentricidade $ellip = 0,45$ e θ definido como $\theta = 95^\circ$. O resíduo resultante da subtração desse modelo da emissão em raios X do aglomerado pode ser conferido na Fig. 4.5. Nesta figura, a descontinuidade ao sul torna-se mais evidente, além de se observar um excesso de emissão ao norte do núcleo do aglomerado, o que sugere um movimento da BCG na direção sul.

Nota-se, nos mapas de [Laganá et al. \(2019\)](#), que há uma região mais fria ao norte do aglomerado, bem como uma alongação de baixa entropia que se estende para o noroeste em relação ao núcleo do aglomerado. Essa região de baixa entropia aparece no mapa de entropia desenvolvido nesta dissertação (Fig. 4.1(c), elipse em amarelo) e também foi notado por [Hudaverdi et al. \(2005\)](#) (veja Fig. 4.7), que sugeriu que sua origem é o gás arrancado de um subgrupo que está caindo no aglomerado, sendo o centro de A3571 o remanescente deste subgrupo. A dimensão dessa região no mapa desenvolvido por nós (~ 90 kpc) é menor do que a observada nos mapas de [Hudaverdi et al. \(2005\)](#) e [Laganá](#)

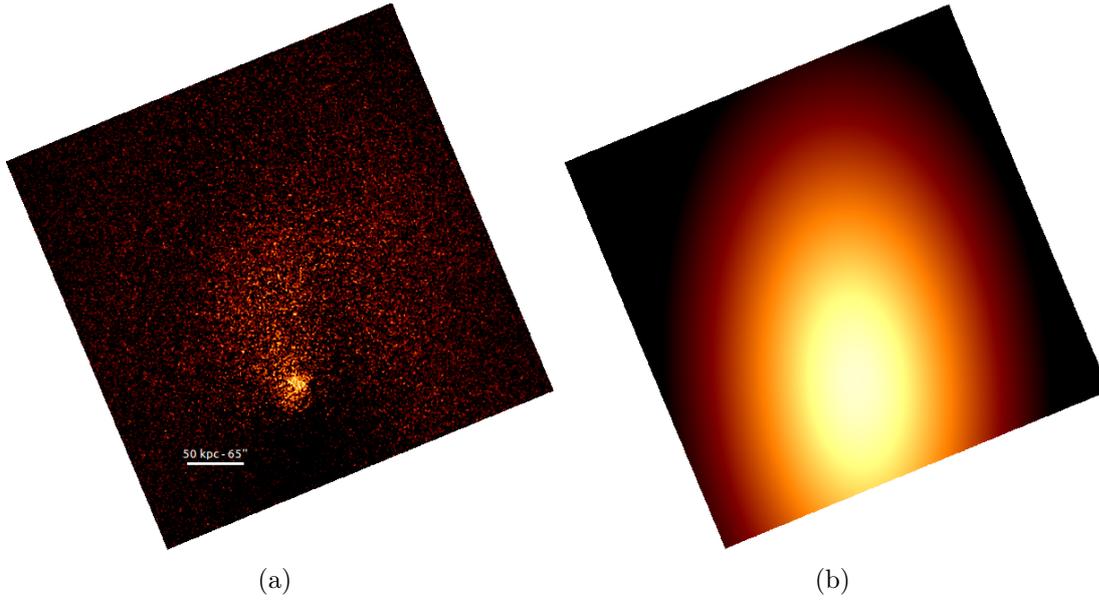


Figura 4.5: Resíduo da subtração entre a emissão em raios X do aglomerado e o modelo β bidimensional ajustado em sua imagem. Em (a) temos o resíduo de todo o CCD S3 e em (b) o modelo ajustado, com $r_c = 117''$, $\beta = 0,74$, excentricidade $ellip = 0,45$ e θ definido como $\theta = 95^\circ$.

et al. (2019), provavelmente devido ao método utilizado para o cálculo da entropia. A direção da região de baixa entropia ao noroeste do centro coincide com a direção da estrutura filamentar que liga A3571 ao complexo de aglomerados principal do Shapley, cujo principal aglomerado é A3558 (veja Fig. 2.2).

Usando o catálogo de velocidades radiais disponibilizado por Quintana *et al.* (2020), construímos um gráfico com a distribuição 3D de galáxias entre os complexos de aglomerados de A3571 e A3558 (veja a Fig. 4.6). Nota-se uma distinção clara de velocidades radiais nos pontos observados, formando três “paredes” de galáxias nas faixas $4000 - 5000 \text{ km/s}$, $\sim 12000 \text{ km/s}$ e $\sim 14500 \text{ km/s}$. Nas duas últimas estão localizados os complexos de A3571 e A3558, respectivamente. A proximidade espacial entre as “paredes” em que estão localizados os complexos de A3571 e A3558, além da posição relativa entre os dois complexos de aglomerados, sugere uma maior probabilidade de colisões entre A3571 e possíveis sistemas mais distantes e ao oeste, relativo a A3571.

O mapa de lenteamento gravitacional fraco elaborado por Fu *et al.* (2024) (veja a Fig. 2.5) mostra uma alongação de massa na direção noroeste que coincide com a direção da região de baixa entropia mencionada anteriormente e com a distribuição espacial de galáxias. Embora os ângulos de alongação na distribuição de galáxias de sequência vermelha (tradução livre de *red sequence galaxies*), a BCG, a superfície de brilho em raios X estejam de acordo com a média encontrada pelos autores para a amostra como um todo (veja §2.1), é notável o alinhamento entre a distribuição de massa (ângulo de posição $\sim -25^\circ$) e a alongação de baixa entropia observada mapas produzidos com o XMM-Newton.

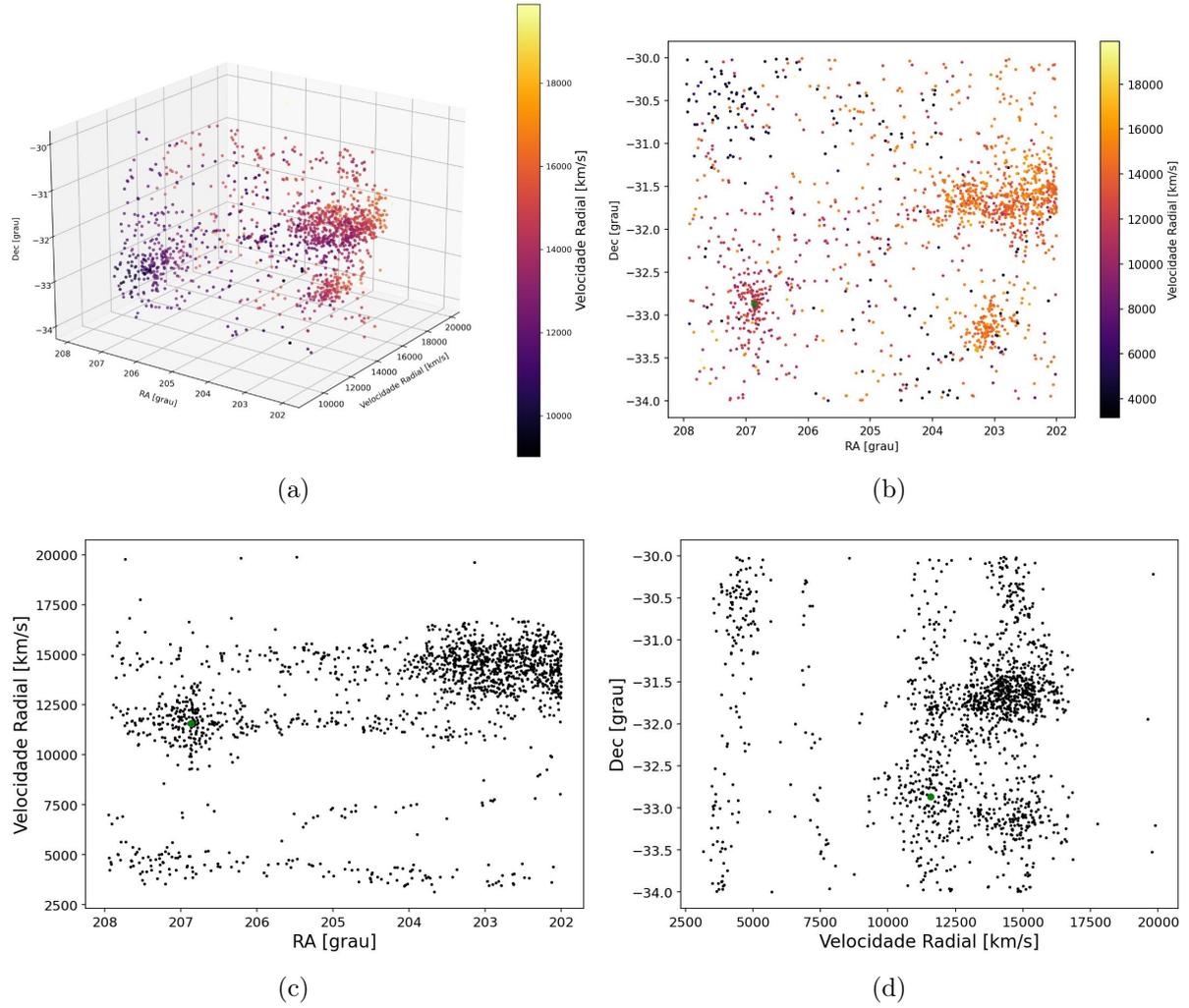


Figura 4.6: Distribuição espacial de galáxias entre o complexo de A3571, a leste, e o complexo de A3558, a oeste. Abaixo do complexo de A3558 está o aglomerado A3560. Nas figuras (a) e (b), as cores representam a velocidade radial em km/s . Em (a) vemos uma projeção 3D no céu, onde consideramos a velocidade radial como indicador de distancia. Em (a) estão representados somente os pontos onde $9000 < v_r < 20000 km/s$, para melhor visualização. Em (b), (c) e (d) vemos projeções 2D correspondentes à uma visão frontal (Dec em função de RA, em (b), com norte para cima e leste para a esquerda), superior (v_r em função de RA, em (c), com leste para a esquerda e a profundidade aumenta para cima) e lateral (Dec em função de v_r , em (d), com norte para cima e profundidade aumenta para a direita), sendo o ponto destacado em verde a BCG de A3571.

4.2 Cálculo de massa

Por mais que as evidências até aqui apontem para um cenário em que o aglomerado esteja perturbado devido à interação com outro sistema, vamos assumir que este se encontra em equilíbrio hidrostático. Calculamos, então, sua massa através da equação 3.26. O valor adotado para a temperatura média do sistema foi de $T = 7 \pm 0.5 keV$. Os parâmetros de modelo- β que representam o melhor ajuste foram: $n_0 = (1,96 \pm 0.10) \times 10^{-2} cm^{-3}$, $r_c = 70,4 \pm 5,5$ segundos de arco e $\beta = 0,58 \pm 0,02$. Para fins de comparação

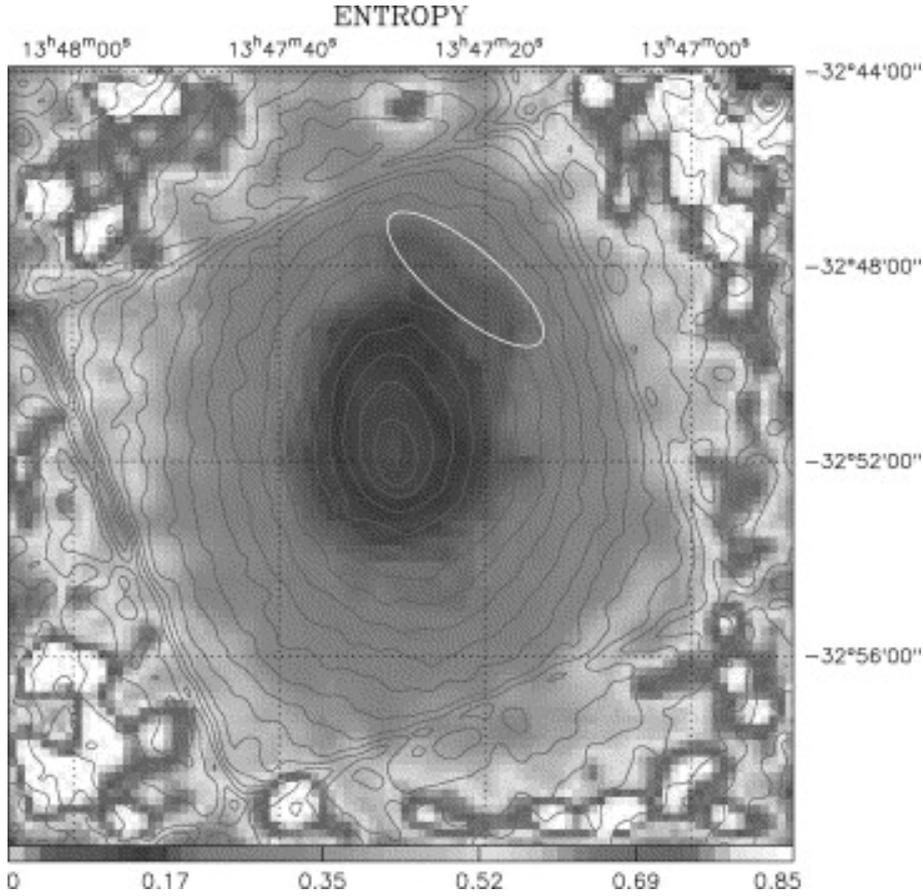


Figura 4.7: Mapa de pseudo-entropia apresentado por [Hudaverdi *et al.* \(2005\)](#), derivado como $kTn^{-2/3}$, onde a escala de cores representam os valores de $HR \times I^{-1/3}$, sendo HR a razão de dureza calculada no trabalho original como $I(1,6 - 10,0) \text{ keV} / I(0,8 - 1,6) \text{ keV}$, sendo a razão das contagens nas respectivas faixas de energia. As unidades indicadas na escala não ficam claras no texto original. A elipse branca destaca a região de baixa entropia que também pode ser observada na Fig. 4.2(c). Na figura, $1' \approx 46,3 \text{ kpc}$.

com os resultado obtidos por [Nevalainen *et al.* \(2001\)](#), a massa é estimada dentro de uma esfera de raio (R_{178}) $38,4' \approx 1,78 \text{ Mpc}$. Assim, a massa calculada foi de $M_{178} = (8,05 \pm 0,64) \times 10^{14} M_{\odot}$, que é condizente com o valor encontrado anteriormente ($M_{\text{tot}}(< 38,4' = r_{178}) = 9,1_{-1,5}^{+3,6} 10^{14} M_{\odot}$).

Capítulo 5

Sumário e conclusões

Aglomerados de galáxias são sistemas ideais para compreender a estrutura e formação do Universo. Suas propriedades, em especial seu estágio dinâmico, são ferramentas fundamentais para entender como as estruturas se formam, interagem e evoluem ao longo do tempo. Neste trabalho, desenvolvemos um código em Python capaz de criar as regiões necessárias e automatizar o ajuste espectral para a elaboração de mapas de parâmetros termodinâmicos de aglomerados de galáxias, como temperatura, pressão e entropia, os quais são essenciais para a correta determinação de seu estágio dinâmico. Neste capítulo, apresentaremos um resumo do trabalho desenvolvido e as conclusões obtidas a partir dos resultados. Ao final, serão apresentadas as perspectivas para a continuação da pesquisa.

Apesar de estar arquivada desde 2004, ainda não havia um mapa de parâmetros termodinâmicos que utilizasse a observação do Chandra disponível para o A3571 (ObsId = 4203). Embora seja o sexto aglomerado mais brilhante em raios X (Edge *et al.*, 1990), este sistema não havia sido descrito em detalhes na literatura, portanto ele foi escolhido como alvo para este trabalho de mestrado.

Os principais resultados foram:

- (i) Pela imagem em raios X, nota-se uma descontinuidade ~ 25 kpc ao sul do centro do aglomerado, que foi confirmada pelo perfil radial de brilho superficial. Esta descontinuidade fica mais evidente no resíduo da emissão em raios X subtraída de um modelo- β 2D, como pode ser visto na Fig. 4.5. No mapa de temperatura, observa-se que há um aumento de temperatura (de 7 keV para 8 keV) na região ao sul da BCG. Pelos perfis radiais de temperatura e pressão, vemos que a temperatura interior à frente ($6,7 \pm 0,7$ keV) é menor do que a temperatura exterior à frente ($8,6_{-0,9}^{+1,1}$ keV) e a pressão é compatível com um valor constante ($\approx 0,12$ keV cm⁻³) dentro dos erros. Assim, a descontinuidade é caracterizada como uma frente fria.
- (ii) O mapa de temperatura produzido com dados do CCD ACIS-S3 mostra inhomogeneidades radiais e azimutais nas regiões próximas ao centro do aglomerado, sendo a temperatura média da região sudeste ao centro do aglomerado ($\sim 7,8$ keV) mais

elevada em relação às regiões ao norte do centro, cuja temperatura está entre 6 e 7 keV. Além disso, não há uma queda de temperatura significativa no núcleo do aglomerado ($T(r < 10 \text{ kpc}) = 7 \pm 0,7 \text{ keV}$);

- (iii) O mapa de pressão mostra que o pico de emissão em raios X está deslocado do ponto de pressão máxima ($\sim 15 \text{ kpc}$);
- (iv) O mapa de entropia mostra que há uma alongação de baixa entropia que se estende até $\sim 75 \text{ kpc}$ em direção ao NE com ângulo de posição (AP) de 20° . A direção da alongação é levemente divergente com a alongação da emissão em raios X, a qual tem $AP = 5^\circ$ e é bem próxima da distribuição de galáxias da sequência vermelha deste aglomerado ($\approx -4^\circ$).
- (v) Nos mapas de entropia apresentados tanto nesta dissertação quanto por Laganá *et al.* (2019) e por Hudaverdi *et al.* (2005), vemos uma região de baixa entropia na região noroeste à 150 kpc do centro do aglomerado.
- (vi) A distribuição de massa detectada por lenteamento gravitacional, no entanto, apresenta uma alongação em $AP = -25^\circ$, que coincide com a região de baixa entropia no noroeste e com a direção da estrutura filamentar vista na Fig. 2.2.
- (vii) A distribuição espacial de galáxias vista na Fig. 4.6 sugere que o noroeste é a direção mais provável para que haja uma fusão com A3571, dada a presença de duas “paredes” de galáxias próximas onde estão os complexos de aglomerados de A3571 e A3558.

Os indícios vistos até aqui sugerem que há pelo menos um grupo de galáxias em colisão com A3571, proveniente da direção noroeste e tendo atravessado o núcleo com parâmetro de impacto diferente de zero. Esse cenário é consistente com a região de baixa entropia ao noroeste, destacada na Fig. 4.7, e a alongação de baixa entropia observada no centro do aglomerado. Esse modelo prevê que a região de alta temperatura observada ao sul do centro do aglomerado com o XMM-Newton por Laganá *et al.* (2019) seria uma frente de choque.

Uma simulação que aborda um cenário semelhante este foi feita por Vaezzadeh *et al.* (2022) e um *frame* do vídeo¹ apresentado pelos autores pode ser conferido na Fig. 5.1. É possível notar a mudança de direção no movimento do centro do grupo incidente, condizente com a diferença observada nos mapas de entropia, e a formação de uma frente fria e uma frente de choque conforme o núcleo do grupo se movimenta no ICM do aglomerado.

Outro possível cenário é que a passagem previa de um ou mais aglomerados de baixa massa já aconteceu e vemos um caso de chacoalhamento da BCG juntamente com seu

¹O vídeo da simulação pode ser visto em <https://youtu.be/fNv38D89Phk?si=xXjID1BUspmXQ5Pt>

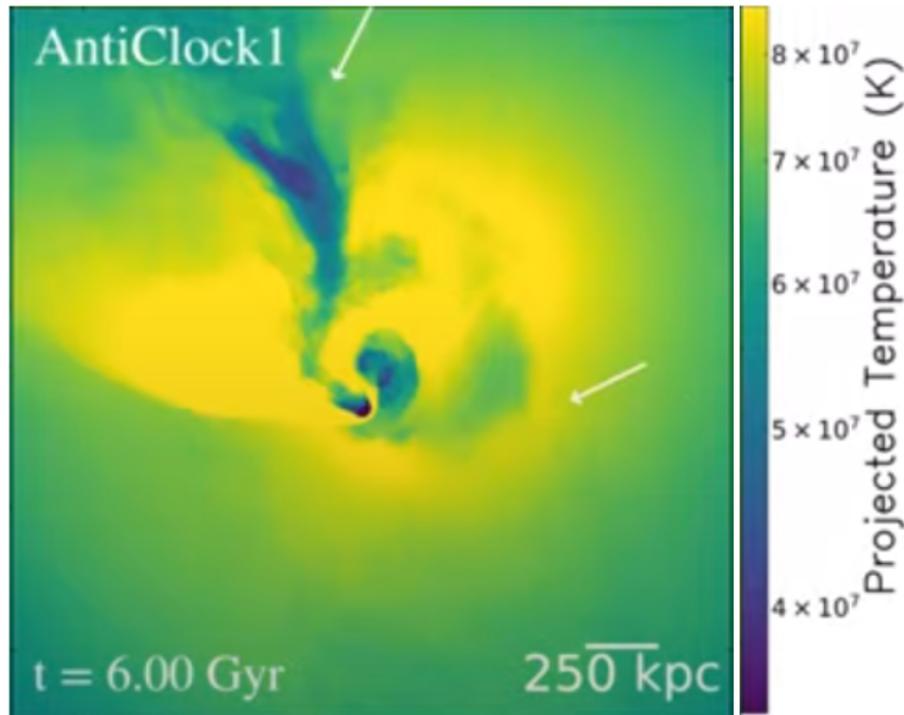


Figura 5.1: Quadro do vídeo da simulação da colisão entre dois aglomerados apresentada por *Vaezzadeh et al. (2022)*. Todo o quadrado tem $2,5 \text{ Mpc}$ de lado e as cores representam a projeção da temperatura ponderada pela densidade ao quadrado, para melhor representar as imagens observacionais (*Vaezzadeh et al., 2022*). No trabalho referenciado, três aglomerados relaxados colidem, sendo a seta mais interna a direção de incidência do primeiro aglomerado e a mais externa, a direção de incidência do segundo (colisão observada na figura). A primeira colisão ocorreu em um momento anterior ao início do vídeo, de forma que o aglomerado resultante após a primeira colisão já apresentava estruturas como as da Fig. 1.10 imediatamente antes da segunda colisão.

núcleo frio gerando a frente fria conforme oscila no centro do aglomerado. A elongação de baixa entropia no centro do aglomerado representaria nesse caso uma combinação de componentes de gás associado ao chacoalhamento da BCG e material arrancado do grupo quando passou próximo ao centro do A3571.

Neste cenário de chacoalhamento do núcleo, seu movimento está associado à frente fria próxima à BCG, mas não com a possível frente de choque que pode ser inferida nos mapas de *Laganá et al. (2019)*. Assim, se torna claro que a natureza da aparente subestrutura na forma de um arco visto com o XMM-Newton é crucial para se discriminar entre os diferentes modelos explicatórios da historia evolutiva recente do A3571.

Os mapas termodinâmicos desenvolvidos neste trabalho foram de suma importância para definir os cenários propostos. Além de serem compatíveis com análises de trabalhos anteriores, eles revelam com mais detalhes as estruturas presentes no aglomerado. Desde a criação das regiões para a extração dos espectros até a suavização adaptativa dos pontos de dados, o procedimento adotado se mostrou eficaz em representar as características termodinâmicas do sistema estudado. Outra aplicação do método desenvolvido por nós

pode ser conferida em Jiménez-Teja *et al.* (2024), que foi resumida no apêndice A.

5.1 Perspectivas

Com o êxito na criação de mapas das distribuições das grandezas termodinâmicas através de observações do Chandra, o procedimento adotado neste trabalho será adaptado para observações do telescópio XMM-Newton. Os mapas de temperatura, pressão e entropia serão construídos e a análise será refeita. Tendo em vista que os mapas desenvolvidos tanto por Hudaverdi *et al.* (2005) quanto por Laganá *et al.* (2019) utilizam da aproximação $n \propto I^{1/2}$, a obtenção dos valores reais de pressão e entropia podem alterar o cenário proposto.

Após a adaptação do código para o XMM-Newton, outros sistemas serão explorados, como os aglomerados pertencentes ao Superaglomerado de Hércules, especialmente Abell 2199 e Abell 2197. Os mapas criados através de observações dos telescópios XMM-Newton e Chandra permitirão determinar os estágios dinâmicos e, através de dados do J-PAS (*Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey*), será possível caracterizar não só as galáxias destes sistemas, mas também o meio inter-aglomerado.

Referências Bibliográficas

- Abell, G. O., 1958, “The Distribution of Rich Clusters of Galaxies.” *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 3 (maio), pp. 211. ISSN: 0067-0049. doi: 10.1086/190036. Publisher: IOP ADS Bibcode: 1958ApJS....3..211A.
- Abell, G. O., Corwin, Jr., H. G., Olowin, R. P., 1989, “A catalog of rich clusters of galaxies”, *ApJS*, v. 70 (maio), pp. 1. ISSN: 0067-0049, 1538-4365. doi: 10.1086/191333.
- Ascasibar, Y., Markevitch, M., 2006, “The Origin of Cold Fronts in the Cores of Relaxed Galaxy Clusters”, *The Astrophysical Journal*, v. 650, n. 1 (oct), pp. 102. doi: 10.1086/506508. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1086/506508>>.
- Assafin, M., Andrei, A. H., Martins, R. V., et al., 2001, “Investigation of USNO-A2.0 Catalog Positions”, *Astrophys. J.*, v. 552, n. 1 (maio), pp. 380–385. doi: 10.1086/320468.
- Batalha, R. M., Dupke, R. A., Jiménez-Teja, Y., 2022, “Ranking Theoretical Supernovae Explosion Models from Observations of the Intracluster Gas”, *Astrophys. J. Suppl.*, 262(1):27. doi: 10.3847/1538-4365/ac7de1.
- Bautz, L. P., Morgan, W. W., 1970, “On the Classification of the Forms of Clusters of Galaxies”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 162 (dez.), pp. L149. doi: 10.1086/180643.
- Bertone, G., Tait, T. M. P., 2018, “A new era in the search for dark matter”, *Nature*, v. 562, n. 7725 (out.), pp. 51–56. doi: 10.1038/s41586-018-0542-z.
- Bonamente, M., Nevalainen, J., 2011, “X-RAY SPECTROSCOPY OF AS1101 WITH CHANDRA, XMM-NEWTON, AND ROSAT: BANDPASS DEPENDENCE OF THE TEMPERATURE PROFILE AND SOFT EXCESS EMISSION”, *ApJ*, v. 738, n. 2 (ago.), pp. 149. ISSN: 0004-637X. doi: 10.1088/0004-637X/738/2/149. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/738/2/149>>. Publisher: The American Astronomical Society.
- Byram, E. T., Chubb, T. A., Friedman, H., 1966, “Cosmic X-ray Sources, Galactic and Extragalactic”, *Science*, v. 152, n. 3718, pp. 66–71. doi: 10.1126/science.

- 152.3718.66. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.152.3718.66>>.
- Birzan, L., Rafferty, D. A., Nulsen, P. E. J., et al., 2012, “The duty cycle of radio-mode feedback in complete samples of clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 427, n. 4 (dez.), pp. 3468–3488. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.22083.x. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.22083.x>>.
- Christensen, F. E., Ramsey, B. D., 2022, “X-Ray Optics for Astrophysics: A Historical Review”. In: *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics*, pp. 1–42, Singapore, Springer Nature Singapore. ISBN: 978-981-16-4544-0. doi: 10.1007/978-981-16-4544-0_1-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4544-0_1-1>.
- Colless, M., Dalton, G., Maddox, S., et al., 2001, “The 2dF Galaxy Redshift Survey: spectra and redshifts”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 328, n. 4 (12), pp. 1039–1063. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04902.x. Disponível em: <<https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04902.x>>.
- Dupke, R., III, R. E. W., Bregman, J. N., 2007, “Different Methods of Forming Cold Fronts in Nonmerging Clusters”, *The Astrophysical Journal*, v. 671, n. 1 (dec), pp. 181. doi: 10.1086/522194. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1086/522194>>.
- Dupke, R. d. A., 1998, *ABUNDANCE GRADIENTS IN CLUSTERS OF GALAXIES*. Tese de Doutorado, University of Alabama.
- Edge, A. C., Stewart, G. C., Fabian, A. C., et al., 1990, “An X-ray flux-limited sample of clusters of galaxies : evidence for evolution of the luminosity function.” *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 245 (jul.), pp. 559.
- Elvis, M., 1976, “Ariel V Sky Survey: long-term monitoring of the X-ray emission from the Coma Cluster and NGC 4151.” *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 177 (out.), pp. 7P–12. doi: 10.1093/mnras/177.1.7P.
- Fabian, A. C., Ferland, G. J., Sanders, J. S., et al., 2022, “Hidden cooling flows in clusters of galaxies”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 515, n. 3 (set.), pp. 3336–3345. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stac2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stac2003>>.
- Felten, J. E., Gould, R. J., Stein, W. A., et al., 1966, “X-Rays from the Coma Cluster of Galaxies”, *Astrophys. J.*, v. 146 (dez.), pp. 955–958. doi: 10.1086/148972.

- Fritz, G., Davidsen, A., Meekins, J. F., et al., 1971, “Discovery of an X-Ray Source in Perseus”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 164 (mar.), pp. L81. doi: 10.1086/180697.
- Fu, S., Dell’Antonio, I., Chary, R.-R., et al., 2022, “LoVoCCS. I. Survey Introduction, Data Processing Pipeline, and Early Science Results”, *Astrophys. J.*, 933(1):84. doi: 10.3847/1538-4357/ac68e8.
- Fu, S., Dell’Antonio, I., Escalante, Z., et al., 2024. “LoVoCCS – II. Weak Lensing Mass Distributions, Red-Sequence Galaxy Distributions, and Their Alignment with the Brightest Cluster Galaxy in 58 Nearby X-ray-Luminous Galaxy Clusters”. fev. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2402.10337>>. arXiv:2402.10337 [astro-ph].
- Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., et al., 1962, “Evidence for x Rays From Sources Outside the Solar System”, *Phys. Rev. Lett.*, v. 9 (Dec), pp. 439–443. doi: 10.1103/PhysRevLett.9.439. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.9.439>>.
- Gursky, H., Kellogg, E., Murray, S., et al., 1971a, “A Strong X-Ray Source in the Coma Cluster Observed by UHURU”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 167 (ago.), pp. L81. doi: 10.1086/180765.
- Gursky, H., Kellogg, E. M., Leong, C., et al., 1971b, “Detection of X-Rays from the Seyfert Galaxies NGC 1275 and NGC 4151 by the UHURU Satellite”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 165 (abr.), pp. L43. doi: 10.1086/180713.
- Hubble, E. P., 1926, “Extragalactic nebulae.” *Astrophys. J.*, v. 64 (dez.), pp. 321–369. doi: 10.1086/143018.
- Hudaverdi, M., Yamashita, K., Furuzawa, A., 2005, “Study of the structure of abell 3571: An XMM-Newton view”, *Advances in Space Research*, v. 36, n. 4 (jan.), pp. 643–649. doi: 10.1016/j.asr.2005.04.022.
- Jiménez-Teja, Y., Gimenez-Alcazar, A., Dupke, R. A., et al., 2024, “First joint MUSE, HST, and JWST spectro-photometric analysis of the intracluster light: the case of the relaxed cluster RX J2129.7+0005”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:2408.11122. doi: 10.48550/arXiv.2408.11122.
- Jiménez-Teja, Y., Dupke, R. A., Lopes, P. A. A., et al., 2023, “Dissecting the RELICS cluster SPT-CLJ0615–5746 through intracluster light: Confirmation of the multiple merging state of the cluster formation”, *AA*, v. 676, pp. A39. doi: 10.1051/0004-6361/202346580. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346580>>.

- Laganá, T. F., Durret, F., Lopes, P. A. A., 2019, “Physical properties of the X-ray gas as a dynamical diagnosis for galaxy clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 484, n. 2 (abr.), pp. 2807–2830. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stz148. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stz148>>.
- Leccardi, A., Rossetti, M., Molendi, S., 2010, “Thermo-dynamic and chemical properties of the intra-cluster medium”, *A&A*, v. 510 (fev.), pp. A82. ISSN: 0004-6361, 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/200913094. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/200913094>>.
- Lopes, P. A. A., Trevisan, M., Laganá, T. F., et al., 2018, “Optical substructure and BCG offsets of Sunyaev–Zel’dovich and X-ray-selected galaxy clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 478, n. 4 (ago.), pp. 5473–5490. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/sty1374. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/sty1374>>.
- Markevitch, M., Ponman, T. J., Nulsen, P. E. J., et al., 2000, “Chandra Observation of Abell 2142: Survival of Dense Subcluster Cores in a Merger”, *Astrophys. J.*, v. 541, n. 2 (out.), pp. 542–549. doi: 10.1086/309470.
- Markevitch, M., Gonzalez, A. H., David, L., et al., 2002, “A Textbook Example of a Bow Shock in the Merging Galaxy Cluster 1E 0657-56”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 567, n. 1 (mar.), pp. L27–L31. doi: 10.1086/339619.
- Markevitch, M., 2002. “On the discrepancy between Chandra and XMM temperature profiles for A1835”. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0205333>>.
- Markevitch, M., Vikhlinin, A., 2007, “Shocks and cold fronts in galaxy clusters”, *Physics Reports*, v. 443, n. 1 (maio), pp. 1–53. ISSN: 0370-1573. doi: 10.1016/j.physrep.2007.01.001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157307000695>>.
- Matheron, G., 1963, “Principles of geostatistics”, *Economic Geology*, v. 58, n. 8 (dez.), pp. 1246–1266. ISSN: 0361-0128. doi: 10.2113/gsecongeo.58.8.1246. Disponível em: <<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>>.
- Meekins, J. F., Fritz, G., Chubb, T. A., et al., 1971, “Physical Sciences: X-rays from the Coma Cluster of Galaxies”, *Nature*, v. 231, n. 5298 (maio), pp. 107–108. doi: 10.1038/231107a0.

- Mitchell, R. J., Culhane, J. L., Davison, P. J. N., et al., 1976, “Ariel 5 observations of the X-ray spectrum of the Perseus cluster.” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 175 (maio), pp. 29P–34P. doi: 10.1093/mnras/175.1.29P.
- Moré, J. J., 1978, “The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory”. In: Watson, G. A. (Ed.), *Numerical Analysis*, pp. 105–116, Berlin, Heidelberg, Agosto. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-35972-2.
- Nagai, D., Vikhlinin, A., Kravtsov, A. V., 2007, “Testing X-Ray Measurements of Galaxy Clusters with Cosmological Simulations”, *The Astrophysical Journal*, v. 655, n. 1 (jan), pp. 98. doi: 10.1086/509868. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1086/509868>>.
- Nevalainen, J., Kaastra, J., Parmar, A. N., et al., 2001, “Temperature and total mass profiles of the A3571 cluster of galaxies”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 369, n. 2 (abr.), pp. 459–466. doi: 10.1051/0004-6361:20010119.
- O’Dell, S. L., Blackwell, William C., J., Cameron, R. A., et al., 2003, “Managing radiation degradation of CCDs on the Chandra X-ray Observatory”. In: Truemper, J. E., Tananbaum, H. D. (Eds.), *X-Ray and Gamma-Ray Telescopes and Instruments for Astronomy.*, v. 4851, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pp. 77–88, mar. doi: 10.1117/12.461493.
- Olive, K., 2014, “Review of Particle Physics”, *Chinese Physics C*, v. 38, n. 9 (aug), pp. 090001. doi: 10.1088/1674-1137/38/9/090001. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1674-1137/38/9/090001>>.
- Peterson, J. R., Fabian, A. C., 2006, “X-ray spectroscopy of cooling clusters”, *Physics Reports*, v. 427, n. 1 (abr.), pp. 1–39. ISSN: 0370-1573. doi: 10.1016/j.physrep.2005.12.007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157306000020>>.
- Peterson, J. R., Kahn, S. M., Paerels, F. B. S., et al., 2003, “High-Resolution X-Ray Spectroscopic Constraints on Cooling-Flow Models for Clusters of Galaxies”, *ApJ*, v. 590, n. 1 (jun.), pp. 207. ISSN: 0004-637X. doi: 10.1086/374830. Publisher: IOP Publishing.
- Pignalberi, A. <., 2019, *A three-dimensional regional assimilative model of the ionospheric electron density*. Doctoral Thesis, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, abr. Disponível em: <<https://amsdottorato.unibo.it/8888/>>.
- Planelles, S., Quilis, V., 2009, “Galaxy cluster mergers”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 399, n. 1 (10), pp. 410–424. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.

- 15290.x. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15290.x>>.
- Quintana, H., de Souza, R., 1993, “Spectroscopic observations of the galaxy cluster A 3571 (SC 1344-325).” *Astron. Astrophys. Suppl.*, v. 101 (nov.), pp. 475–483.
- Quintana, H., Proust, D., Dünner, R., et al., 2020, “A redshift database towards the Shapley supercluster region”, *Astron. Astrophys.*, 638:A27. doi: 10.1051/0004-6361/202037726.
- Rossetti, M., Molendi, S., 2010, “Cool core remnants in galaxy clusters”, *A&A*, v. 510 (fev.), pp. A83. ISSN: 0004-6361, 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/200913156. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/200913156>>.
- Rubin, V. C., Ford, W. Kent, J., 1970, “Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions”, *Astrophys. J.*, v. 159 (fev.), pp. 379. doi: 10.1086/150317.
- Rybicki, G. B., Lightman, A. P., 2004, *Radiative processes in astrophysics*. Physics textbook. Weinheim, Wiley. ISBN: 978-0-471-82759-7.
- Sanderson, A. J. R., Ponman, T. J., O’Sullivan, E., 2006, “A statistically selected Chandra sample of 20 galaxy clusters – I. Temperature and cooling time profiles”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 372, n. 4 (nov.), pp. 1496–1508. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10956.x. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10956.x>>.
- Sarazin, C. L., 1988, *X-ray emission from clusters of galaxies*. Cambridge University Press.
- Seward, F. D., Charles, P. A., 2010, *Exploring the X-ray Universe*. Cambridge University Press.
- Sheppard, W. F., 1911. “Interpolation”. Disponível em: <https://en.wikisource.org/wiki/1911_Encyclop%C3%A6dia_Britannica/Interpolation>.
- Vaezzadeh, I., Roediger, E., Cashmore, C., et al., 2022, “Resilience of sloshing cold fronts against subsequent minor mergers”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 514, n. 1 (03), pp. 518–534. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stac784. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stac784>>.
- Venturi, T., Bardelli, S., Zagaria, M., et al., 2002, “Radio emission from the A3571 cluster complex: The final stage of a cluster merger?” *Astronomy & Astrophysics*, v. 385, n. 1 (abr.), pp. 39–54. doi: 10.1051/0004-6361:20020117.

- Vikhlinin, A., Markevitch, M., Murray, S. S., 2001, “A Moving Cold Front in the Inter-galactic Medium of A3667”, *Astrophys. J.*, v. 551, n. 1 (abr.), pp. 160–171. doi: 10.1086/320078.
- Wackernagel, H., 2003, *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783540441427.
- Wolf, M., 1906, “Über einen Nebelfleck-Haufen im Perseus”, *Astronomische Nachrichten*, v. 170 (jan.), pp. 211.
- Zwicky, F., 1933, “Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln”, *Helvetica Physica Acta*, v. 6 (jan.), pp. 110–127. doi: 10.1007/s10714-008-0706-5.
- Zwicky, F., Herzog, E., Wild, P., et al., 1961-68, “Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies”, *Pasadena, CA: CIT*, v. 1-6.

Apêndice A

RX J2129.7+0005

O código para a criação de mapas desenvolvido durante este mestrado foi aplicado a outro sistema (Jiménez-Teja *et al.*, 2024), RX J2129.7+0005 (RXJ2129) – um aglomerado de galáxias relaxado em $z = 0,234$. Este trabalho é focado no estudo da ICL, onde foram utilizados dados do *Multi Unit Spectroscopic Explorer* (MUSE), *Hubble Space Telescope* (HST) e *James Web Space Telescope* (JWST), para elaborar mapas de distribuição espacial de ICL (e.g., Fig. A.1). Desta análise, o sistema foi classificado como relaxado, mesmo apresentando subestruturas como conchas, nuvens com diferentes densidades, morfologia aproximadamente retangular e uma sobredensidade (*clump*) de ICL a oeste da BCG. Além destas características, a alongação da distribuição de ICL e do gás do ICM coincidem ($AP \sim 70^\circ$).

Os mapas de parâmetros termodinâmicos criados a partir de dados em raios X do satélite Chandra (veja Fig. A.2), porém com quadrados com 1000 contagens ao invés de 3000. Estes mapas evidenciam a presença de uma frente fria a oeste da BCG, assim como possíveis frentes frias no sul-sudeste e nor-nordeste e a existência de um *cool-core*. Essas características indicam o cenário de múltiplas frentes frias causadas pelo chocalhamento do núcleo frio do aglomerado e, juntamente com o baixo valor de entropia ($16,0 \pm 2,4 \text{ keV cm}^2$), levam à conclusão de que este é um sistema relaxado.

A análise dos mapas de ICL juntamente com os mapas termodinâmicos feitos com dados em raios X proporcionaram uma melhor caracterização do estágio dinâmico deste sistema que, embora não esteja perturbado hidrostáticamente, sofreu uma grande fusão há $\sim 6,6$ Giga-anos, o que condiz com as subestruturas observadas.

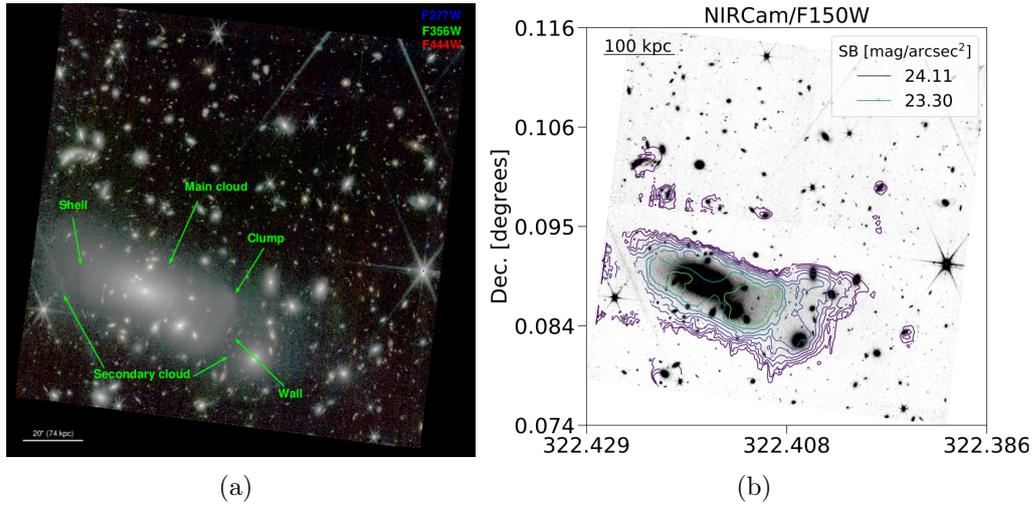


Figura A.1: ICL vista com o JWST. Em (a) temos a imagem em cores fantasia gerada pelos filtros F277W, F356W e F444W do JWST. Destacada na imagem, vemos a nuvem principal mais densa, a nuvem secundária menos densa e subestruturas como conchas à esquerda da BCG, uma parede à direita e uma sobredensidade (*clump*) na borda superior desta parede. Em (b) vemos um dos mapas de ICL gerados, onde os contornos representam a superfície de brilho da ICL e ao fundo temos a imagem original do filtro F150W do JWST.

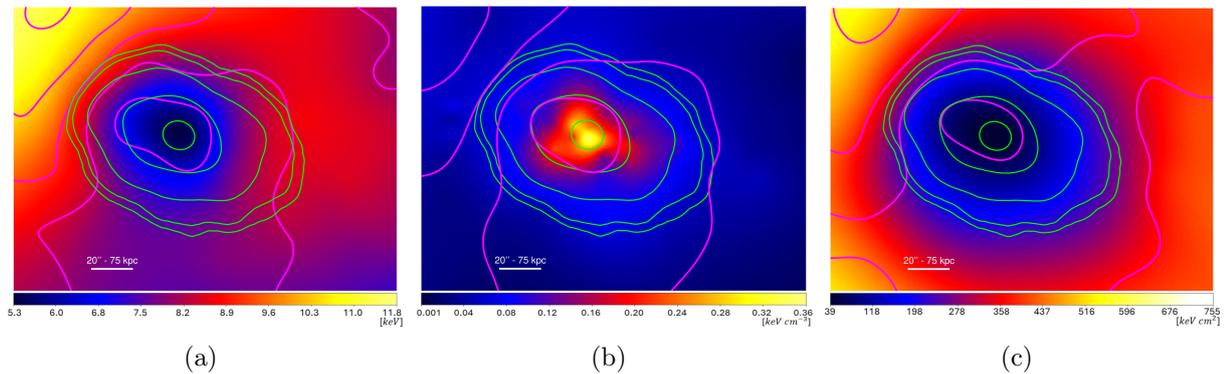


Figura A.2: Mapas suavizados de temperatura (a), pressão (b) e entropia (c) para RXJ2129. Em todos os três mapas, os contornos verdes representam o brilho superficial em raios-X e os contornos magenta representam os erros relativos para cada parâmetro. No mapa de temperatura, os contornos delimitam as regiões dentro das quais os erros relativos são de 15%, 20%, 25%, 30% e 35%, aumentando do centro para fora. No mapa de pressão, os contornos representam erros relativos de 25%, 30%, 35% e 40%, e, no mapa de entropia, 20%, 27,5%, 35% e 42,5%.