

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo

Comparação de Métodos de Estimar Massas de
Aglomerados de Galáxias

Autora:

Stephane Vaz Werner de Almeida

Banca Examinadora:

Paulo Afrânio Augusto Lopes (Orientador – OV/UFRJ)

Karín Menéndez-Delmestre (OV/UFRJ)

Marco Grossi (OV/UFRJ)

Gustavo Henrique Dopcke (OV/UFRJ)

Projeto de Conclusão de Curso
para a obtenção do título de Astrônoma

Defendido em:

31 de Julho de 2017

Dedicado aos meus pais e avós

“Exatamente como trêmulos meninos que tudo receiam nas obscuras trevas, assim nós tememos à luz do dia o que em nada é mais de recear do que as fantasias que atemorizam os meninos no escuro. E a este terror do espírito e a estas trevas não afastam nem os raios do Sol, nem os luminosos dardos do dia: só o fazem o estudo da natureza e suas leis.”

Tito Lucrecio, *Sobre a Natureza das Coisas - De Rerum Natura*, I A.E.C.

Resumo

Comparação de Métodos de Estimar Massas de Aglomerados de Galáxias

por Stephane Vaz Werner de Almeida

Objetivo: O objetivo é comparar diferentes métodos de estimar massas de aglomerados de galáxias. Entender como os métodos se comparam entre si, e entender porque essa diferença ocorre. E, assim, descobrir qual o mais acurado e preciso. E, dessa forma, analisar como isso interfere nas propriedades físicas do aglomerados e das galáxias, assim como a estrutura em larga escalada do universo - através da função de massa e parâmetros cosmológicos.

Amostra: São utilizadas dois tipos de *dados*: dados observados e dados simulados. Os dados observados são uma amostra de 183 aglomerados com dados do Sloan, com dados de fotometria e espectroscopia de aproximadamente 6000 galáxias. Os dados simulados são cerca de 900 aglomerados e milhares de galáxias da simulação Millennium, e cerca de 700 aglomerados e milhares de galáxias da simulação EAGLE.

Método: Aplicamos, até agora, 2 métodos na amostra anteriormente mencionada: o método do virial associado ao método shifting gapper para excluir intrusas, e o método da cáustica. O método do virial se baseia no equilíbrio dinâmico do aglomerado, e é portanto limitado espacialmente - isto é, não pode ser aplicado em raios maiores que o raio do virial. Enquanto o método da cáustica se baseia na velocidade de escape para distinguir membros e não membros. Ambos os métodos se baseiam na distribuição de velocidades das galáxias do aglomerado, no qual utilizamos o redshift e as posições das galáxias no céu para obter o centro do aglomerado, as dispersões de velocidades e assim, as massas.

Resultados: A partir dessas duas amostras e desses dois métodos, pudemos concluir que o método do virial recupera melhor M_{200} dos aglomerados simulados do que o método da Cáustica. Obtivemos que ambos os métodos recuperam dispersões de velocidades em acordo, para ambas as amostras. Para a amostra observada, obtivemos valores maiores - em geral - para as massas estimadas com o método do virial, assim como os R_{200} .

Abstract

Comparing Methods of Estimation of Galaxy Clusters' Masses

by Stephane Vaz Werner de Almeida

Objective: The main goal is to compare different methods to estimate the mass of galaxy clusters. We want to understand how these methods compare with each other, and understand which is the most accurate and precise. From this we analyse how this interfer in physical properties of the clusters and of the galaxies, as well as the large scale structure of the universe through the mass function and cosmological parameters.

Sample: We use observed and simulated data. The observed data comprises a sample of 183 clusters with SDSS data, we use photometry and spectroscopy of approximately 6000 galaxies. The simulated data have approximately 900 clusters and thousands of galaxies extracted from Millennium Simulation, and approximately 700 clusters and thousands of galaxies extracted from EAGLE Simulation.

Method: We applied two methods in the sample mentioned above: the virial method associated to the shifting gapper method to exclude interlopers, and the caustic method. The virial method is based on dynamical equilibrium of the cluster, because of this it is spatially limited, while the caustic method is based on the scape velocity to distinguish members and interlopers. Both methods are based on the distribution of galaxies' velocities, in which we utilized the redshifts and galaxies' positions on the sky to obtain the cluster center, the velocity dispersions, and then the masses.

Results: Using these two samples and these two methods, we could conclude that the virial method has a better recover of M_{200} for the simulated clusters than the caustic method. We got that both methods recover velocity dispersion in agreement with each other. For the observed sample, we obtained greater values, in general, for the masses estimated with the virial method, the same happened to R_{200} .

Agradecimentos

Quando me dei conta eu estava em um ambiente completamente novo. As estruturas físicas das construções e de algumas salas me eram estranhas, as pessoas agiam de forma diferente em certos aspectos e havia uma agitação no ar que não era comum no colégio. Aos 17 anos eu entrava na universidade, e pela primeira vez eu tive contato com pessoas que tinham algo em comum comigo de uma forma peculiar: a astronomia. A ideia de criança em se tornar astronauta havia sido transformada em uma jornada acadêmica em ciência.

E, nada disso teria sido possível sem a minha família. Agradeço aos meus pais por terem instigado a curiosidade em mim durante a infância de diversas formas. Seja pelo telescópio que ganhei de presente aos 5 anos de idade, ou aos livros de astronomia que me compraram na bienal do livro, ou até mesmo pelos programas de televisão educativos que viam comigo, que iam desde a vida dos animais na selva até desenhos que instigavam a profissão de cientista, como O Laboratório de Dexter. Obrigado pelo apoio que sempre me deram ao longo da minha vida, serei sempre eternamente grata a vocês. Agradeço também aos meus avós e minhas primas, que sempre estiveram ao meu lado nas horas difíceis e nas horas de maior felicidade. Obrigado também a Raquel, minha irmã, que sempre acreditou em mim e sempre permaneceu ao meu lado.

Já dentro da universidade, conheci pessoas incríveis. A Ana e o Pedro foram os melhores amigos de turma que eu poderia ter tido, obrigado por sempre me darem força quando as coisas apertam e pelos melhores rolês. Meus veteranos também sempre foram muito amistosos e cheios de abraços. Obrigado, em especial, ao Felipe, por ter sempre me ajudado quando eu precisava, seja nas matérias ou na IC. Obrigado aos meus amigos da vila, por estarem do meu lado nas mais diversas situações, sejam elas de felicidade ou tristeza. Agradeço imensamente aos professores que me serviram de inspiração. Em especial, ao professor Thiago, que me ensinou boa parte do que eu sei sobre astrofísica, fosse na minha primeira IC ou nas disciplinas de graduação mais inspiradoras que eu tive. Obrigado também a professora Karín, por ser um exemplo a ser seguido para mim.

E devo agradecimento, principalmente, ao meu orientador, o Paulo. Obrigado por ter sido tão paciente todo este tempo, por ter respondido minhas mil perguntas que sempre tive e por me apresentar a área de pesquisa que mais tenho afinidade até então.

Sumário

Resumo	iii
Abstract	iv
Agradecimentos	v
Sumário	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	ix
Abreviações	x
1 Introdução	1
2 Aglomerados de Galáxias	3
2.1 Características Gerais	3
2.1.1 Aglomerados no Óptico	4
2.1.2 Aglomerados em Raios-X	5
2.1.3 Aglomerados em Microondas	6
2.1.4 Grupos	7
2.1.5 Formação e Evolução de Galáxias	8
2.2 Relações de Escala	9
2.3 Função de Massa	9
3 Principais Métodos de Estimativas de Massas	11
3.1 Análise do Virial	13
3.1.1 O Teorema do Virial	13
3.1.2 O Teorema do Virial no Contexto de Aglomerados	15
3.2 Raios-X	17
3.3 Lentes Gravitacionais	18
3.4 O Método de Jeans	21
3.5 O Método da Cáustica	23

4	As Amostras	25
4.1	A Amostra Observada	25
4.1.1	SDSS	25
4.1.1.1	SDSS-I	26
4.1.1.2	SDSS-II	26
4.1.1.3	SDSS-III	26
4.1.1.4	SDSS-IV	27
4.1.2	Os Dados	28
4.2	A Amostra Simulada	32
4.2.1	Simulação Millennium	32
4.2.2	Simulação EAGLE	36
5	Desenvolvimento	40
5.1	O Método da Cáustica	40
5.1.1	A Técnica	40
5.1.2	A Aplicação	44
5.2	A Análise do Virial	47
5.2.1	A Técnica	47
5.2.2	A Aplicação	47
6	Resultados	49
6.1	Resultados Utilizando-se a Amostra Observada	49
6.2	Resultados Utilizando-se a Amostra Simulada	50
6.2.1	Simulação Millennium	50
6.2.2	Simulação EAGLE	52
6.3	Discussão	53
7	Conclusões e Perspectivas Futuras	54
	Referências Bibliográficas	55

Lista de Figuras

2.1	Aglomerado no óptico	4
2.2	Emissão bremsstrahlung	5
2.3	Aglomerados vistos no óptico e em raios-X	6
2.4	Espalhamento Compton	7
2.5	Efeito S-Z	7
2.6	Diagrama de diapasão de Hubble	8
2.7	Função de massa	10
3.1	Efeito de lentes gravitacionais capturada pelo Hubble Frontier Fields. . .	18
3.2	Esquema da geometria do efeito de lentes gravitacionais.	19
3.3	Esquema σ_{los}	22
3.4	Diagramas de redshift	24
4.1	Simulação Millennium	32
4.2	Simulação EAGLE	36
4.3	Base de Dados da Simulação EAGLE	37
5.1	Dendrograma que representa a árvore binária.	42
5.2	Coordenadas celestes de um aglomerado exemplo.	43
5.3	Sigma plateau	43
5.4	Diagrama de redshift	44
5.5	Perfil de massa obtido pela técnica da cáustica	44
5.6	Seleção de membros com procedimento de "shifting gapper".	48
6.1	Comparando as dispersões de velocidades da amostra do SDSS	50
6.2	Comparando os R_{200} e M_{200} obtidos pela amostra do SDSS	50
6.3	Comparando as dispersões de velocidades para Simulação Millennium . .	51
6.4	Comparação de R_{200} para Simulação Millennium.	52
6.5	Comparação de M_{200} para Simulação Millennium.	52

Lista de Tabelas

4.1	Dados dos aglomerados obtidos do SDSS.	30
4.2	Dados das galáxias obtidos do SDSS.	31
4.3	Dados dos aglomerados obtidos da Simulação Millennium	34
4.4	Dados das galáxias obtidos da Simulação Millennium	35
4.5	Dados dos aglomerados obtidos da base de dados da Simulação EAGLE.	38
4.6	Dados das galáxias obtidos da base de dados da Simulação EAGLE.	39
5.1	Tabela de entrada para o CausticApp.	45

Abreviações

SDSS	<i>Sloan Digital Sky Survey</i>
EAGLE	<i>Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments</i>
DES	<i>Dark Energy Survey</i>
J-PAS	<i>Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey</i>
DR	<i>Data Release</i>
Λ CDM	<i>Lambda Cold Dark Matter Model</i>
NoSOCS	<i>Northern Sky Optical Cluster Survey</i>
CIRS	<i>Cluster Infall Regions in SDSS</i>

Capítulo 1

Introdução

Aglomerados de galáxias são as maiores e últimas estruturas do universo que já possuíram tempo para atingir o equilíbrio do virial. São importantes para o estudo em larga escala do Universo, já que através de aglomerados podemos inferir os parâmetros cosmológicos. A maior parte das galáxias do universo estão em aglomerados ou grupos, então o estudo de aglomerados se relaciona fundamentalmente com a formação e evolução de galáxias; e podem ser considerados laboratórios para o estudo das mesmas (Voit, 2005).

Existem diversas relações de escala que envolvem a massa de aglomerados de galáxias, as relações: massa-luminosidade, massa-temperatura e massa-riqueza. As massas de aglomerados também estão relacionadas a dispersão de velocidades das galáxias pertencentes aos mesmos. Além disso, a função de massa nos dá pistas do modelo cosmológico através dos parâmetros cosmológicos. Então torna-se de extrema importância que tenhamos medidas corretas das massas dos aglomerados. No entanto, estimar de forma precisa e acurada a massa de grandes amostras de aglomerados de galáxias não é uma tarefa trivial.

Nos últimos anos tivemos evidências de que cerca de 70% do universo é constituído de energia escura, e quase 30% de matéria - no qual estima-se que aproximadamente 85% é matéria escura, ou seja, não-bariônica. Sabemos desde a década de 90 que o universo está se expandindo aceleradamente, e ligamos tal afastamento à energia escura. No entanto, ainda não sabemos qual a sua natureza. Diversos levantamentos vêm sendo feitos com o intuito de descobrir qual a essência da energia escura. Entre eles podemos

citar o DES (*Dark Energy Survey*) e o J-PAS (*Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey*). Tais levantamentos possuem aglomerados entre seus observáveis prioritários e serão de extrema utilidade para o estudo destes.

Grandes levantamentos tem sido feitos pelo SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*), atualmente está em andamento o SDSS-IV. O SDSS foi precursor dos grandes levantamentos atuais, e neste trabalho utilizamos espectroscopia e fotometria do SDSS; que nos possibilitou aplicar os métodos e compará-los entre si.

Com o advento tecnológico e desenvolvimento destes grandes levantamentos, é possível que façamos ciência de uma forma nunca antes feita, pois temos acesso a uma grande plataforma de dados, que nos provê amostras estatisticamente robustas. Além disso, o avanço tecno-científico nos possibilitou um desenvolvimento computacional mais sólido, de forma que podemos automatizar os processos, e criar simulações que nos permitem comparar modelos e observações. Como exemplos, podemos citar as simulações cosmológicas: Millennium, EAGLE e Illustris, que são simulações do estado-da-arte; falaremos mais delas no capítulo 4.

No capítulo 2 são introduzidos conceitos gerais sobre aglomerados de galáxias: como são vistos no óptico, em raios-X e em microondas; o que são grupos; a relação dos aglomerados com formação e evolução de galáxias, as relações de escala e a função de massa. Falaremos sobre os principais métodos de estimar massas de aglomerados no capítulo 3. Abordaremos a análise do virial, a utilização de raios-X para estimar massas, o uso de lentes gravitacionais, o método de Jeans e o método da cáustica. No capítulo seguinte definimos as amostras utilizadas, uma amostra observada e duas simuladas - retiradas das simulações do Millennium e EAGLE. Há uma discussão mais detalhada sobre os métodos que foram aplicados no capítulo 5. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 6, e faremos uma breve discussão sobre os processos físicos que envolvem os resultados. E, por fim, temos as conclusões e perspectivas futuras no último capítulo.

Capítulo 2

Aglomerados de Galáxias

Neste capítulo faremos uma breve revisão sobre o que são aglomerados de galáxias e suas principais características, para que nos capítulos seguintes possamos entrar em questões mais específicas.

2.1 Características Gerais

Aglomerados de galáxias são estruturas que contém cerca de dezenas a milhares de galáxias que se mantêm ligadas pela gravidade. São os maiores sistemas gravitacionalmente ligados no universo (Voit, 2005).

Suas massas estão na faixa de $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$ e seus tamanhos são da ordem de $\approx 2,0 Mpc$, suas dispersões de velocidades são aproximadamente 500-1200 km/s e suas energias térmicas da ordem 0,5-12 keV (Voit, 2005). Eles emitem em várias faixas do espectro, principalmente no óptico, raios-X e microondas, como veremos a seguir.

2.1.1 Aglomerados no Óptico

Na faixa do óptico do espectro eletromagnético, os aglomerados são vistos como um conjunto de galáxias. A figura 2.1 e a figura 2.3 da direita são imagens de aglomerados na faixa do óptico do espectro eletromagnético.

Pelo imageamento no óptico podemos estimar a riqueza do aglomerado, ou seja, o número de galáxias do mesmo. Além disso, uma vez identificadas as galáxias, podemos estimar suas velocidades através dos redshifts; o que possibilita estudar a dinâmica do sistema. No óptico ainda há os indícios dos efeitos de lentes gravitacionais. Esses três observáveis podem ser úteis para estimar as massas dos aglomerados. A massa observada no óptico é muito pequena comparada a massa total do aglomerado, em geral. Isso ocorre pois a maior parte da massa está na forma de matéria escura, que só interage gravitacionalmente; e a maior parte da matéria bariônica está na forma de gás, que identificamos através do imageamento em raios-X.

Ainda no óptico, é possível examinarmos a proporção de galáxias elípticas e espirais, e suas dinâmicas no interior dos aglomerados, falaremos mais sobre isso na seção de evolução de galáxias.



FIGURA 2.1: Aglomerado Abell 370 no óptico pelo Hubble Frontier Field. Figura extraída de <http://hubblesite.org/image/4024/gallery>.

2.1.2 Aglomerados em Raios-X

Aglomerados de galáxias são fontes de raios-X porque a formação de galáxias é ineficiente; a maior parte dos gases do universo estão no meio intergaláctico e só uma pequena parte está contida nas galáxias (Voit, 2005). O potencial gravitacional do aglomerado o comprime e aquece até que ele emita em temperaturas da faixa dos raios-X. A temperatura que podemos inferir através do espectro se correlaciona com o poço de potencial do aglomerado e as linhas de emissão dos espectros nos fornece a composição química do meio - elementos como ferro, oxigênio e silício (Sarazin, 1988).

Devido a emissão bremsstrahlung térmica pelo plasma do meio intraglomerado, podemos detectar aglomerados na faixa dos raios-X do espectro eletromagnético. A figura 2.2 ilustra como ocorre a emissão bremsstrahlung: um elétron é desviado de sua rota pelo núcleo de um átomo, e assim, emite um fóton.

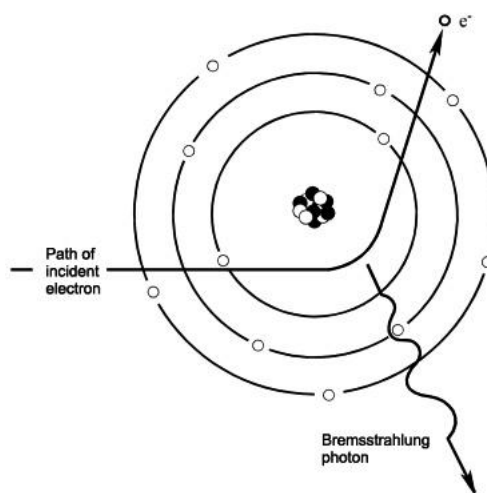


FIGURA 2.2: Imagem ilustrativa da emissão bremsstrahlung. Figura extraída de <https://media.licdn.com/mpr/mpr/AAEAAQAAAAAAAAAeyAAAAJDE0MjExYWwNkLTQ3YTctNGI4NC1hNTRkLTAxY2EzYjAxZTY0ZA.jpg>.

A figura 2.3 mostra como os aglomerados, em geral, são vistos em raios-X e no óptico. Podemos comparar como os aglomerados são vistos nessas diferentes faixas do espectro através das imagens separadamente.

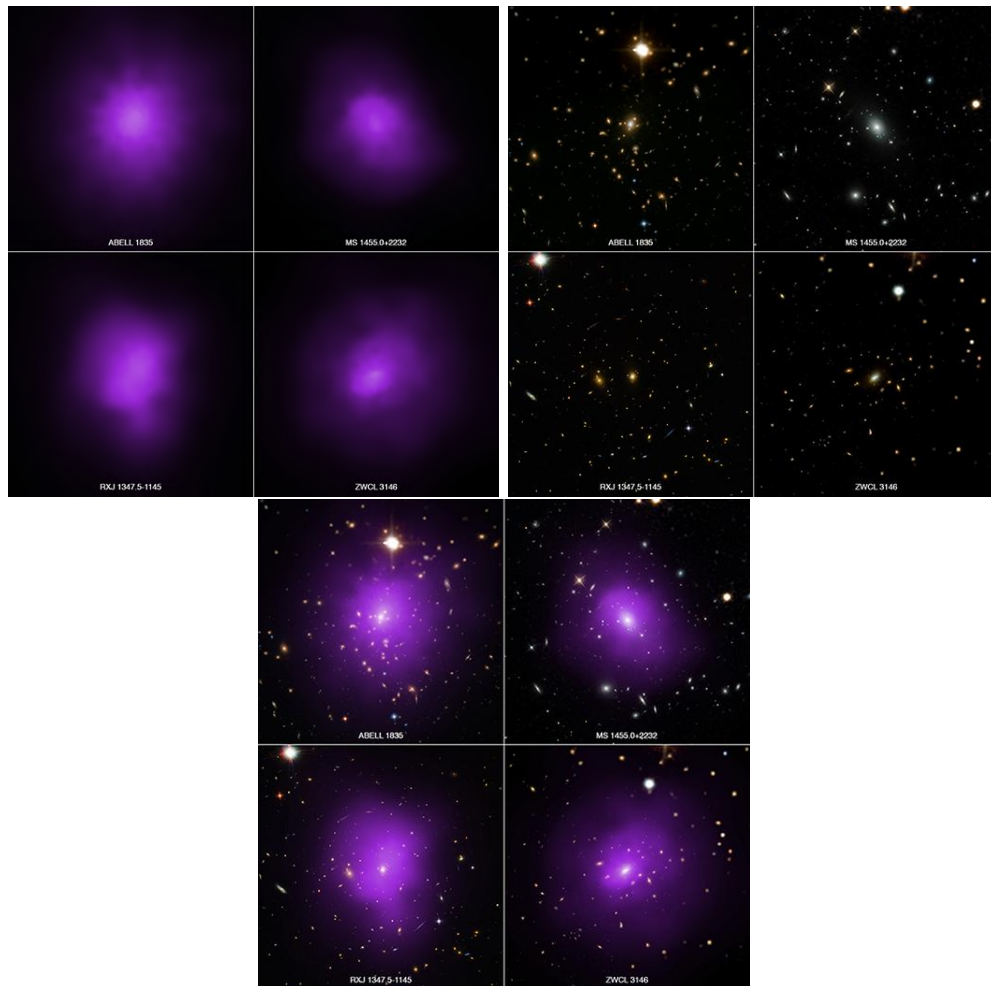


FIGURA 2.3: A imagem da esquerda da parte superior são aglomerados vistos em raios-X pelo telescópio Chandra. Os mesmos aglomerados são vistos no óptico na figura da direita. A figura logo abaixo são os mesmos aglomerados anteriores porém vistos em ambas as faixas do espectro. Figura extraída de [https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/probing – dark – energy – with – galaxy – clusters.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/probing_dark_energy_with_galaxy_clusters.html).

2.1.3 Aglomerados em Microondas

Depois da descoberta da radiação cósmica de fundo, Weymann (1966) calculou que ela poderia ser modificada devido ao Espalhamento Compton, provocado pela passagem através de gás quente intergaláctico. A figura 2.4 ilustra o Espalhamento Compton, no qual um fóton interage com um elétron e, assim, tem seu comprimento de onda modificado.

Sunyaev & Zeldovich (1969) previram que este efeito poderia ocorrer com o gás quente presente nos aglomerados de galáxias. E, assim, a radiação cósmica de fundo seria vista com uma energia a mais, proveniente da interação da radiação com o gás

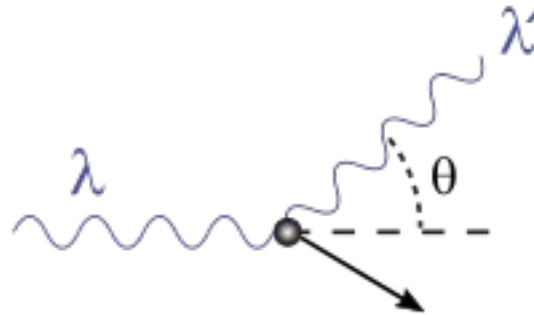


FIGURA 2.4: Ilustração do Espalhamento Compton. Figura extraída de <http://static.newworldencyclopedia.org/thumb/e/e3/Compton-scattering.svg/259px-Compton-scattering.svg.png>.

intraglomerado. A figura 2.5 exemplifica como o espectro da radiação cósmica de fundo se modifica devido ao Efeito S-Z.

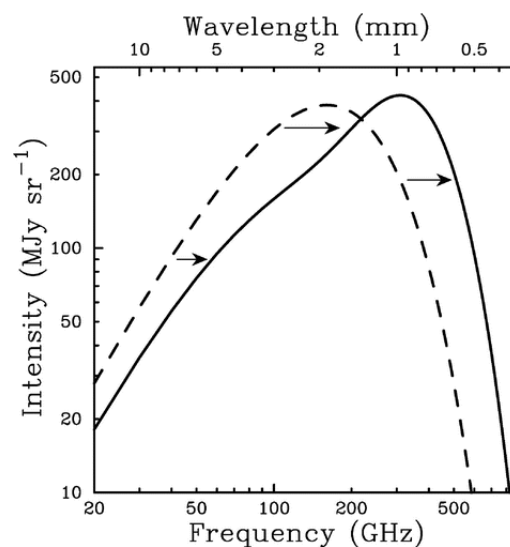


FIGURA 2.5: O efeito S-Z observado em um gráfico de intensidade por comprimento de onda. Figura extraída de <http://astro.uchicago.edu/sza/images/primer/araafig1.gif>.

2.1.4 Grupos

Grupos são estruturas menores, com dezenas de galáxias, não mais que 50; seus diâmetros vão de 1-2 Mpcs. São as estruturas de galáxias mais comuns no universo. Eles diferem dos aglomerados pois, em geral, são mais novos e ainda não são estruturas relaxadas, logo ainda não estão virializados. Segundo o modelo hierárquico de formação de estruturas, os grupos ainda não interagiram o suficiente com o meio e entre si para que haja equilíbrio dinâmico (Schneider, 2006).

As dispersões de velocidades são menores, não possuem necessariamente simetria esférica e um único núcleo de concentração. A porcentagem de galáxias espirais é maior do que em aglomerados. Suas massas são em torno de $10^{13}M_{\odot}$.

2.1.5 Formação e Evolução de Galáxias

Desde a descoberta de galáxias como objetos distantes por Hubble (1926), muito tem sido feito para entender como as galáxias se formam e evoluem. Uma tentativa de Hubble de classificar morfologicamente as galáxias deu origem ao que hoje chamamos de Diagrama de Diapasão de Hubble. Este esquema é uma representação das diferentes morfologias das galáxias, veja a figura 2.6. Ele divide as galáxias em 3 principais grupos: elípticas, lenticulares e espirais.

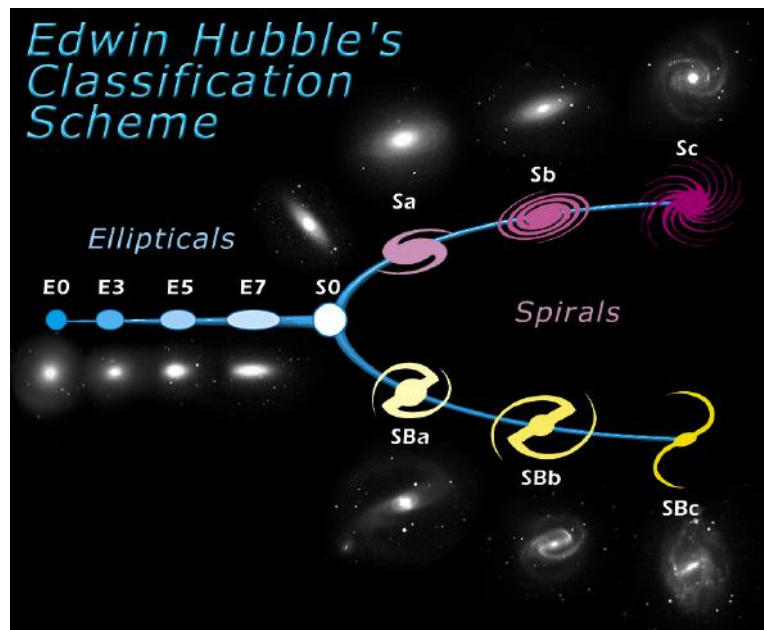


FIGURA 2.6: Diagrama de Diapasão de Hubble. Figura extraída de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/21/HubbleTuningFork.jpg>.

Hubble acreditava que as elípticas evoluíam para as espirais. Hoje sabemos que, em geral, ocorre o contrário. As galáxias espirais interagem umas com as outras e com o meio intraglomerado, de forma que sua formação estelar é cessada e há uma transformação morfológica e temos, assim, galáxias elípticas - em alguns casos pode-se ter uma fase S0 antes da fase elíptica.

No entanto, existem muitas questões abertas acerca de como as galáxias evoluem e quais os mecanismos que fazem com que ocorra essa evolução. Aglomerados de galáxias

são importantes laboratórios para entender evolução de galáxias, visto que a maior parte das galáxias estão em aglomerados e grupos. Estudando aglomerados, suas propriedades e sua dinâmica interior, podemos ter pistas sobre como funciona a formação e evolução das galáxias.

2.2 Relações de Escala

Relações de Escala são úteis para se inferir as massas de aglomerados. Isso é feito vinculando a massa com alguns observáveis.

Uma das formas de estimar a função de massa é através da luminosidade em raios-X do aglomerado. Podemos também conectar a massa à quantidade de galáxias que o aglomerado possui no óptico até determinado raio - observável conhecido como riqueza. Além disso, podemos ainda correlacionar a massa a temperatura em raios-X do gás intraglomerado. A dispersão de velocidades é o análogo no óptico à temperatura em raios-X. Falaremos quantitativamente destes observáveis no capítulo 3.

2.3 Função de Massa

A função de massa descreve a densidade numérica de aglomerados em uma determinada faixa de massa, e é utilizada para testar diferentes teorias de formação de estruturas no universo.

A figura 2.7 é um exemplo de função de massa obtida por Bahcall & Cen (1992). Eles obtiveram a função de massa a partir de observações de aglomerado no óptico e em raios-X. As diferentes linhas indicam as funções de massa esperadas por diferentes cosmologias CDM (matéria escura fria) usando simulações de estruturas em larga escala.

O modelo Λ CDM é o modelo cosmológico mais aceito atualmente e conhecido como o modelo cosmológico padrão; no entanto, existem, ainda, outros modelos que visam explicar a formação e evolução do universo em larga escala. Estes modelos possuem alguns parâmetros a serem calculados. A função de massa de aglomerados de galáxias é uma ferramenta poderosa para inferir parâmetros cosmológicos, como, por exemplo, a flutuação de massa em uma escala de $8h^{-1}Mpc$, σ_8 , e a abundância total de matéria

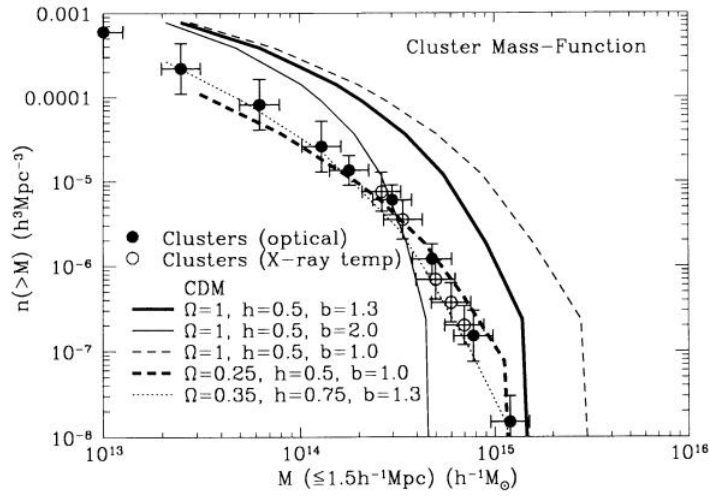


FIGURA 2.7: Funções de Massa provenientes de observações e simulações (Bahcall & Cen, 1992).

Ω_m . E, a partir disso, podemos inferir o modelo cosmológico que mais se encaixa com os valores dos parâmetros observados.

Visto que a função de massa é uma ferramenta relevante para inferir os parâmetros cosmológicos, torna-se necessário um cálculo preciso e acurado das massas dos aglomerados. Esta é uma das motivações mais relevantes para o trabalho que aqui é feito.

Capítulo 3

Principais Métodos de Estimativas de Massas

Fritz Zwicky, em 1933, estimou pela primeira vez a massa de um aglomerado de galáxias (Zwicky, 1933). Sua estimativa de massa para o aglomerado de Coma foi baseada somente em 8 galáxias. Ele encontrou que a massa deste aglomerado é maior que $2,0 \times 10^{14} M_{\odot}$; e também estimou a razão massa-luminosidade. Dessa forma, notou que faltava aproximadamente 90% da massa necessária para o raio que estimou de Coma, ou seja, essa matéria era "invisível" ou "escura" (Zwicky, 1937, 1951). Sendo assim, foi o primeiro a propor a existência da matéria escura. Para calcular essa massa, ele utilizou argumentos dinâmicos, utilizando a análise do virial, que foi, historicamente, o primeiro método utilizado para estimar a massa de aglomerados.

Com o lançamento de satélites na década de 1960, foi descoberta emissão em raios-X na direção do aglomerado de Virgo, o aglomerado mais próximo da Galáxia. Nesta época não havia previsão de que aglomerados deveriam emitir em raios-X, então foi uma descoberta inesperada. O primeiro levantamento que cobriu todo o céu em raios-X utilizou o satélite Uhuru (1971) e estabeleceu a emissão em raios-X dos aglomerados como uma classe. Com isso, métodos foram desenvolvidos para estimar a massa de aglomerados utilizando-se a emissão em raios-X dos aglomerados.

O efeito de lentes gravitacionais é uma das previsões da Teoria da Relatividade Geral de Einstein, que discutiu o efeito em um famoso artigo em 1936 - o efeito também foi discutido por Chowlson em 1924. Em 1937, Zwicky propôs que aglomerados de

galáxias poderiam atuar como lentes gravitacionais (Zwicky, 1937). Somente 42 anos depois o efeito foi confirmado com a observação de um quasar (Walsh et al., 1979). A descoberta de lenteamento forte devido a um aglomerado de galáxias foi relatada por Soucail et al. (1987) e hoje são rotineiramente vistas, em especial, nos levantamentos profundos do Telescópio Espacial Hubble.

Binney & Tremaine (1987) propuseram a análise de Jeans, que, assim como o método do virial, é uma análise dinâmica do sistema. Através desta análise foi possível desenvolver um novo método de estimar a massa de aglomerados utilizando-se sua dinâmica.

Diaferio & Geller (1997) propuseram um novo método, também dinâmico, de estimar massa de aglomerados de galáxias, que ficou conhecido como método da cáustica. Seu nome é devido à aparência da curva teórica que aparece no diagrama de redshift - falaremos mais sobre o diagrama mais adiante - que parece uma "cáustica".

Neste capítulo serão apresentados os métodos mais utilizados para se estimar massas de aglomerados de galáxias em ordem histórica: a análise do virial, a análise de Jeans, uma estimativa através do imageamento em raios-X, a estimativa através de lentes gravitacionais e o método da cáustica. Lembrando que além desses existem outros métodos que não falaremos aqui, como o método "least-action" (e.g. Peebles et al., 1989) e variantes (e.g. Mohayaee & Tully, 2005).

3.1 Análise do Virial

3.1.1 O Teorema do Virial

O Teorema do Virial é um importante teorema em mecânica, que tem importância na mecânica quântica, relatividade e astrofísica.

Considere um sistema de N partículas indexadas pela letra i . Seja r_i , v_i , p_i e m_i a posição, velocidade, momento e massa da partícula i . Seja F_i a força sobre a partícula i . O Teorema do Virial estabelece: para N partículas pontuais ligadas em um sistema a energia cinética média no tempo das partículas ($\sum \frac{1}{2} m_i v_i^2$) mais a metade da média no tempo de $\sum \vec{F}_i \cdot \vec{r}_i$ é igual a zero. Vamos provar o que dissemos que foi estabelecido. Para cada partícula temos:

$$\begin{aligned}\vec{v}_i &= \frac{d\vec{r}_i}{dt}, \\ \vec{p}_i &= m_i \vec{v}_i, \\ \frac{d\vec{p}_i}{dt} &= \vec{F}_i.\end{aligned}\tag{3.1}$$

Vamos definir $H \equiv \sum \vec{p}_i \cdot \vec{r}_i$. Se derivamos H em relação ao tempo,

$$\frac{dH}{dt} = \sum \left(\frac{d\vec{p}_i}{dt} \right) \cdot \vec{r}_i + \sum \vec{p}_i \cdot \left(\frac{d\vec{r}_i}{dt} \right).\tag{3.2}$$

O primeiro termo da direita da equação 3.2 pode ser escrito como $\sum \vec{F}_i \cdot \vec{r}_i$. Já o segundo termo pode ser reescrito como $\sum m_i \left(\frac{d\vec{r}_i}{dt} \right)^2 = \sum m_i \vec{v}_i^2 = 2K$. Assim,

$$\frac{dH}{dt} = \sum \vec{F}_i \cdot \vec{r}_i + 2K.\tag{3.3}$$

Sabendo-se que a média de uma variável $y(t)$ sobre um intervalo que vai de 0 a τ é definido como

$$\bar{y} = \left(\frac{1}{\tau} \right) \int_0^\tau y(t) dt,\tag{3.4}$$

queremos então que

$$\overline{\frac{dH}{dt}} = \sum \overline{\vec{F}_i \cdot \vec{r}_i} + 2\overline{K}. \quad (3.5)$$

A média no intervalo de tempo fica então

$$\overline{\frac{dH}{dt}} = \frac{1}{\tau} [H(\tau) - H(0)]. \quad (3.6)$$

Para um sistema cíclico, ou seja, um sistema que no tempo τ é igual ao sistema inicial $\overline{\frac{dH}{dt}}$ vale 0. Se o sistema não é cíclico, o limite no qual τ aumenta indefinidamente é 0. Assim,

$$\sum \overline{\vec{F}_i \cdot \vec{r}_i} + 2\overline{K} = 0. \quad (3.7)$$

Se as forças podem se relacionar com os potenciais da forma

$$\vec{F}_i = \frac{\partial \vec{V}}{\partial r_i}, \quad (3.8)$$

então

$$2\overline{K} - \frac{\partial \vec{V}}{\partial r_i} \cdot \vec{r}_i = 0. \quad (3.9)$$

Para sistemas que se mantêm unidos por forças gravitacionais ou atração eletrostática o Teorema do Virial se reduz a

$$\overline{K} + \frac{1}{2}\overline{V} = 0, \quad (3.10)$$

pois essas forças são inversamente proporcionais ao quadrado da distância, o que significa que o potencial é proporcional ao inverso da distância.

3.1.2 O Teorema do Virial no Contexto de Aglomerados

Este método utiliza as velocidades das galáxias em um aglomerado, para isso, precisamos utilizar espectroscopia das galáxias. Além disso, precisamos estimar o raio do aglomerado. Uma vez que tenhamos essas velocidades e o raio, supomos que o sistema está virializado, ou seja: consideramos que o Teorema do Virial é válido para este aglomerado.

O Teorema do Virial, no contexto da astrofísica, estabelece que para um sistema estável, autogravitante, no qual há uma distribuição esférica de objetos idênticos (podem ser estrelas em outro contexto, mas no caso consideramos galáxias) vale a relação

$$U = -2K \quad (3.11)$$

no qual U é a energia potencial total do sistema e K é a energia cinética total do sistema.

Então, supondo que tenhamos um sistema de N corpos iguais de massas m , cada um com velocidade v_i tal que podemos calcular o valor médio $\langle v^2 \rangle$, podemos calcular a energia potencial do sistema e a energia cinética do mesmo. Para uma esfera autogravitante de densidade constante ρ , massa M , e raio R ; a energia potencial é dada integrando toda a energia potencial gravitacional sobre todos os pontos da esfera

$$\begin{aligned} U &= - \int_0^R \frac{G(\frac{4}{3}\pi\rho r^3)(4\pi r^2\rho dr)}{r} \\ &= -\frac{16}{3}\pi G\rho^2 \int_0^R r^4 dr \\ &= -\frac{16}{15}\pi^2\rho^2 GR^5. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Se consideramos que $M = \frac{4}{3}\pi R^3\rho$, temos que para uma distribuição esférica uniforme a energia potencial total será dada por

$$U = -\frac{3GM^2}{5R} \quad (3.13)$$

no qual M é a massa total e R é o raio estimado do sistema. E a energia cinética é dada por:

$$K = \frac{M \langle v^2 \rangle}{2}. \quad (3.14)$$

Sabendo que a dispersão de velocidades pode ser relacionada com as velocidades por $\langle v^2 \rangle = 3\sigma^2$, pois σ é a dispersão de velocidade radial e temos que considerar as velocidades nas outras dimensões; teremos a Massa do Virial

$$M_{\text{virial}} = \frac{5R\sigma^2}{G}. \quad (3.15)$$

Este é o resultado da massa do virial aplicada de forma simplificada. No entanto, ao aplicar este método enfrentamos alguns problemas que não foram considerados.

Consideramos, inicialmente, que o sistema está em equilíbrio dinâmico, e isso nem sempre é válido para aglomerados. Quando há interação entre aglomerados, em geral, o sistema não está em equilíbrio dinâmico. Sistemas jovens, ou seja, pouco massivos - em geral grupos - possuíam pouco tempo para se tornarem virializados, ou seja, às vezes não estão virializados. Em algumas situações podemos considerar que o aglomerado está virializado até certo raio. Então há uma certa limitação na sua aplicação.

Outro problema a ser enfrentado é a questão das galáxias intrusas. Não sabemos efetivamente quais galáxias estão gravitacionalmente ligadas ao aglomerado e quais não estão. E isso propaga erros ao método.

Algo que também é válido citar, é a necessidade de uma amostra robusta para que o método seja estatisticamente confiável. Ou seja, precisamos de uma grande amostra de galáxias com espectroscopia e fotometria.

Em Lopes et al. (2009a) há uma minuciosa descrição de como a análise do virial é feita para os aglomerados que iremos utilizar neste trabalho. Aplicamos o método de "shifting-gapper" para identificar intrusas e selecionar as galáxias que são membros do aglomerado. Precisamos também estimar o raio que utilizaremos e corrigir os efeitos de projeção.

3.2 Raios-X

A emissão em raios-X dos aglomerados de galáxias é do tipo bremsstrahlung térmica e é resultado da radiação do gás intraaglomerado. A temperatura deste gás pode variar de $T \approx 10^7 - 10^8$ K () e é a maior componente bariônica dos aglomerados - $M_g \approx 5 - 7M_*$ - e pode chegar a 20% da massa total nos aglomerados (em geral é cerca de 10 %) - a maior componente é de matéria escura (Djorgovski, 2017; Dvorkin & Rephaeli, 2015).

Se assumirmos que o aglomerado está em equilíbrio hidrostático, podemos afirmar que

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2}\rho. \quad (3.16)$$

Sabendo que a lei dos gases ideais é dada por

$$P = \left(\frac{\rho}{\mu m_H} \right) kT, \quad (3.17)$$

no qual μ é o peso molecular médio (0,6 para um plasma ionizado), m_H é a massa do átomo de hidrogênio, k é a constante de Boltzmann, ρ é a densidade do gás, P é a pressão e r a distância ao centro do aglomerado em coordenadas esféricas.

Assim, temos que

$$\frac{dP}{dr} = \left(\frac{k}{\mu m_H} \right) \left(T \frac{d\rho}{dr} + \rho \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{GM(r)}{r^2}\rho. \quad (3.18)$$

Dessa forma, a expressão para a massa fica

$$M(r) = -\frac{kT}{\mu m_H G} \left(\frac{d \ln \rho}{d \ln r} r \right). \quad (3.19)$$

Então, se sabemos $\frac{d \ln \rho}{d \ln r}$ podemos calcular a distribuição de massa do aglomerado.

3.3 Lentes Gravitacionais

Em 1986, dois grupos descobriram fontes em forma de arco em dois aglomerados de galáxias em alto redshift. Na época eles foram chamados de "arcos" ou "arcos luminosos gigantes". Várias hipóteses tentaram explicar o que eram estes arcos. Com a obtenção do espectro do aglomerado Abell 370, mostrou-se que a fonte estava em um redshift muito acima do redshift do aglomerado que era analisado. Ou seja, o arco é uma fonte de fundo, sujeita ao efeito de lentes gravitacionais.

Devido às inomogeneidades da distribuição de matéria no universo, fótons emitidos por galáxias muito distantes mudam de caminho. A presença de um aglomerado de galáxias faz com que os fótons que vêm de galáxias distantes mudem de percurso devido a deformação do espaço-tempo causada pelo aglomerado. Assim, o aglomerado faz o papel de uma "lente", no efeito conhecido por lentes gravitacionais.

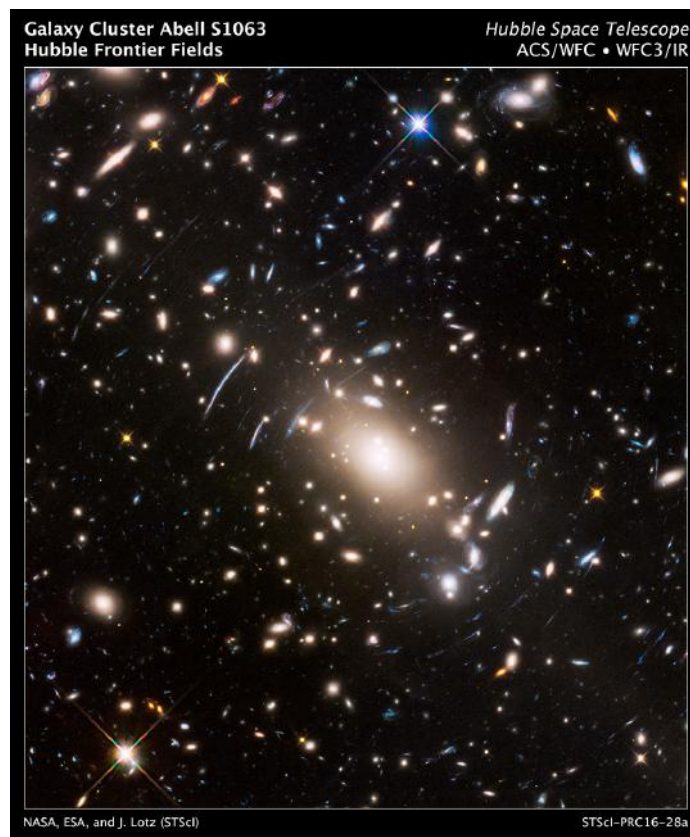


FIGURA 3.1: Efeito de lentes gravitacionais capturada pelo Hubble Frontier Fields.

A partir da deformação causada nas imagens das galáxias de fundo, é possível estimar a massa do aglomerado que está entre nós e as galáxias, já que a deformação nas galáxias está relacionada a deformação causada pelo poço de potencial gravitacional

do aglomerado. Essa técnica independe do estado dinâmico do sistema, não importa se ele ainda não está virializado ou está em processo de fusão com um grupo ou outro aglomerado. Ou seja, a técnica é útil no caso de sistemas dinamicamente jovens ou perturbados Hoekstra (2007). Além disso, a técnica de lentes independe da matéria bariônica presente, além de não depender também da razão massa-luminosidade. A figura 3.1 é um exemplo do efeito de lentes gravitacionais, note as distorções causadas nas galáxias de fundo devido ao efeito.

Existem dois tipos de lentes: as fortes e as fracas. No contexto de aglomerados, o lenteamento forte se dá quando há imagens múltiplas de uma mesma fonte. Os efeitos do lenteamento fraco são mais sutis e importantes para o mapeamento de matéria escura no universo. O principal problema relacionado a obtenção de massa por lenteamento fraco se dá devido a presença de estruturas em larga escala ao longo da linha de visada (Hoekstra, 2001). A figura 3.2 é um esquema de como o efeito de lentes gravitacionais ocorre.

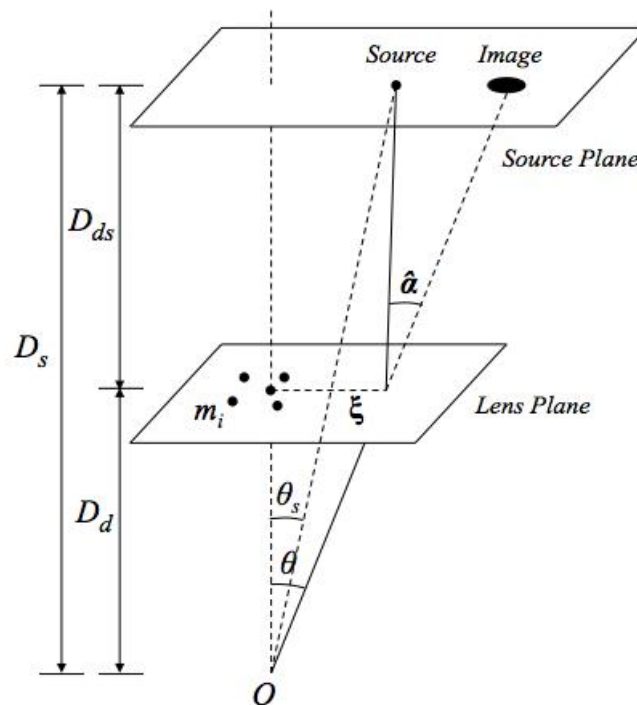


FIGURA 3.2: Esquema da geometria do efeito de lentes gravitacionais.

Podemos fazer uma primeira estimativa de massa utilizando o lenteamento forte, a partir dos arcos formados - e magnificações. Assumimos uma distribuição esférica de massa, e estimamos o raio de Einstein do aglomerado - a distância do arco até o centro do

aglomerado, geralmente o centro é definido pela galáxia mais brilhante do aglomerado. Dessa forma, uma estimativa de massa é aplicada (Schneider, 2006).

$$M(\theta_{arc}) \approx \pi r_E^2 \Sigma_{cr} \approx \pi (D_d^{ang} \theta_{arc})^2 \Sigma_{cr}. \quad (3.20)$$

Essa é a estimativa de massa mais simples utilizando-se lenteamento forte, e confiável dentro de 30% (Bartelmann & Steinmetz, 1996). No qual

$$\Sigma_{cr} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_d D_d s}. \quad (3.21)$$

Através do lenteamento fraco podemos estimar o perfil de densidade de massa do aglomerado através dos efeitos de cisalhamento e de magnificação (Schneider et al., 2000). Um método estatístico é sugerido por Fahlman et al. (1994)

$$\chi(r_1, r_2) = \bar{\Sigma}(r_1) - \bar{\Sigma}(r_1 < r < r_2) = \frac{2\Sigma_{cr}}{1 - r_1^2/r_2^2} \int_{r_1}^{r_2} \langle \epsilon \rangle d \ln r, \quad (3.22)$$

no qual $\langle \epsilon \rangle$ é a média das componentes tangenciais das elipsidades da imagem (Sadat, 1997).

3.4 O Método de Jeans

Podemos estimar a massa dentro de um determinado raio utilizando-se a equação de Jeans, juntamente com uma equação adicional que relaciona a densidade numérica de galáxias projetada com a dispersão de velocidades projetada em um raio R (Girardi et al., 1998a,b).

Binney & Tremaine (1987) fazem uma discussão sobre a aplicação das equações de Jeans para sistemas esféricos e sistemas assimétricos. Fazendo algumas premissas, as equações de Jeans tomam uma forma mais simples: assumimos que o sistema está em equilíbrio hidrodinâmico estável, simetria esférica e uma única dispersão de velocidade tangencial. A equação de Jeans então toma a forma

$$\frac{1}{\nu} \frac{\partial \nu \sigma_{rr}^2}{\partial r} + 2 \frac{\sigma_{rr}^2 - \sigma_{t1}^2}{r} = - \frac{\partial \Phi}{\partial r} = - \frac{GM_r}{r^2}. \quad (3.23)$$

Os termos σ_{rr} e σ_{t1} podem ser visualizados na figura 3.3. Considerando-se o tensor de dispersão de velocidades isotrópico

$$\frac{1}{\nu} \frac{\partial \nu \sigma^2}{\partial r} = - \frac{\partial \Phi}{\partial r} = - \frac{GM_r}{r^2}. \quad (3.24)$$

Para medir o desvio destas condições, é definido o parâmetro de anisotropia β

$$\beta \equiv 1 - \frac{\sigma_{t1}^2}{\sigma_{rr}^2} \quad (3.25)$$

no qual $-\infty < \beta < 1$, com os extremos correspondendo, respectivamente, a uma órbita puramente circular ou puramente radial. A equação 3.24 pode ser reescrita de forma a nos dar uma expressão para a massa do sistema dentro de um raio r

$$M(r) = - \frac{r \sigma_{rr}^2}{G} \left[\frac{d \ln \nu}{d \ln r} + \frac{d \ln \sigma_{rr}^2}{d \ln r} + 2\beta(r) \right]. \quad (3.26)$$

Há uma dificuldade ao se obter $\beta(r)$ pois através das observações só temos a dispersão de velocidade da linha de visada σ_{los} e não temos σ_{rr} e σ_{t1} , observe o esquema da figura 3.3. Outra dificuldade prática dos métodos dinâmicos (lê-se: que utilizam

o espaço de fase para análise) em geral é a presença de galáxias intrusas, como já foi citado para o caso do virial. Fizemos algumas premissas que também podem não ser satisfeitas, o sistema pode não estar em equilíbrio hidrodinâmico e não ter simetria esférica; nesse caso, teríamos que excluir galáxias de subaglomerados da amostra ou excluir os aglomerados em si da amostra. Se tivermos uma amostra pobre (poucas galáxias brilhantes por aglomerado), provavelmente também teremos enviesamentos.

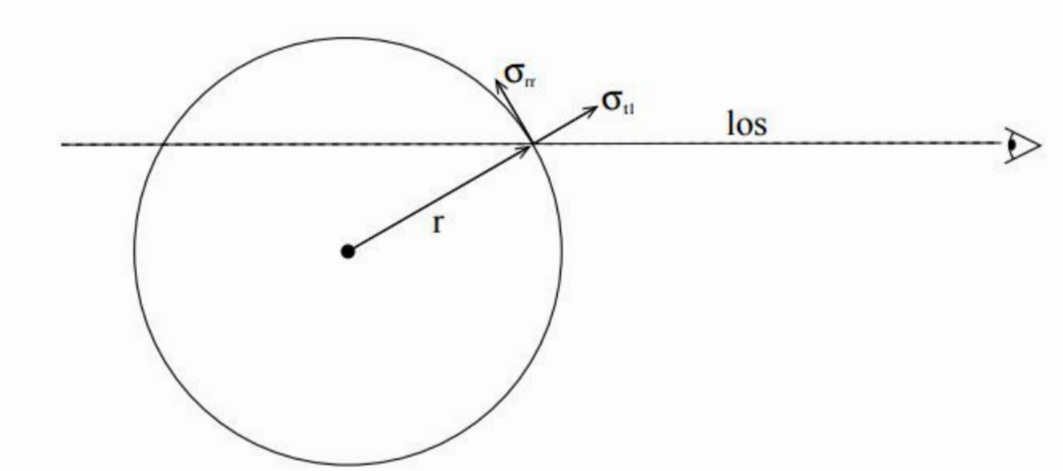


FIGURA 3.3: Observe que através da observação só temos σ_{los} . Figura retirada de Binney & Tremaine (1987).

3.5 O Método da Cáustica

O método da cáustica foi desenvolvido no contexto em que o modelo de "spherical infall", somente, não predizia a amplitude do campo de velocidades corretamente. Isso ocorre porque o campo de velocidades nas regiões de "infall" dos aglomerados contém movimentos aleatórios significativos. Métodos que estimam o parâmetro cosmológico de densidade ω_0 baseados neste modelo acabam por nos dar uma estimativa não confiável.

Utilizando simulações de N-corpos, vemos que no diagrama de redshift há a formação de uma curva com forma de trompete, já esperada pelo modelo de "spherical infall" (e.g. Jing & Borner, 1996; van Haarlem & van de Weygaert, 1993). No entanto, essas amplitudes são maiores que as esperadas pelo modelo, e isso ocorre devido aos movimentos aleatórios que ocorrem nesta região.

Neste cenário, Diaferio & Geller (1997) propõem então que há uma relação entre a amplitude do campo de velocidades das regiões de "infall" com a velocidade de escape dessas regiões: a primeira é uma medida direta da segunda. Desse modo, os movimentos aleatórios são também levados em consideração. Assim, tendo a velocidade de escape, podemos estimar a massa do aglomerado. A vantagem desse método é que ele não assume equilíbrio dinâmico, e vai além do raio do virial.

Considerando-se a dinâmica de Newton, temos que

$$\frac{mv_{esc}^2}{2} = -\frac{GmM}{r}. \quad (3.27)$$

Assim, podemos relacionar a velocidade de escape com o potencial gravitacional

$$v_{esc}^2(r) = -2\phi(r). \quad (3.28)$$

Se a dinâmica do sistema é dominada pelo potencial gravitacional, as galáxias que não podem escapar estão em um local bem definido do espaço de fase. O extremo dessas velocidades definem o perfil da velocidade de escape do sistema em cada raio, como mostrado nos diagramas de redshift na figura 3.4. Dado que temos o perfil da velocidade de escape podemos obter o perfil de massa (Diaferio, 1999; Diaferio & Geller, 1997)

$$GM(< r) = \mathcal{F}_\beta \int_0^r v_{esc}^2(r') dr'. \quad (3.29)$$

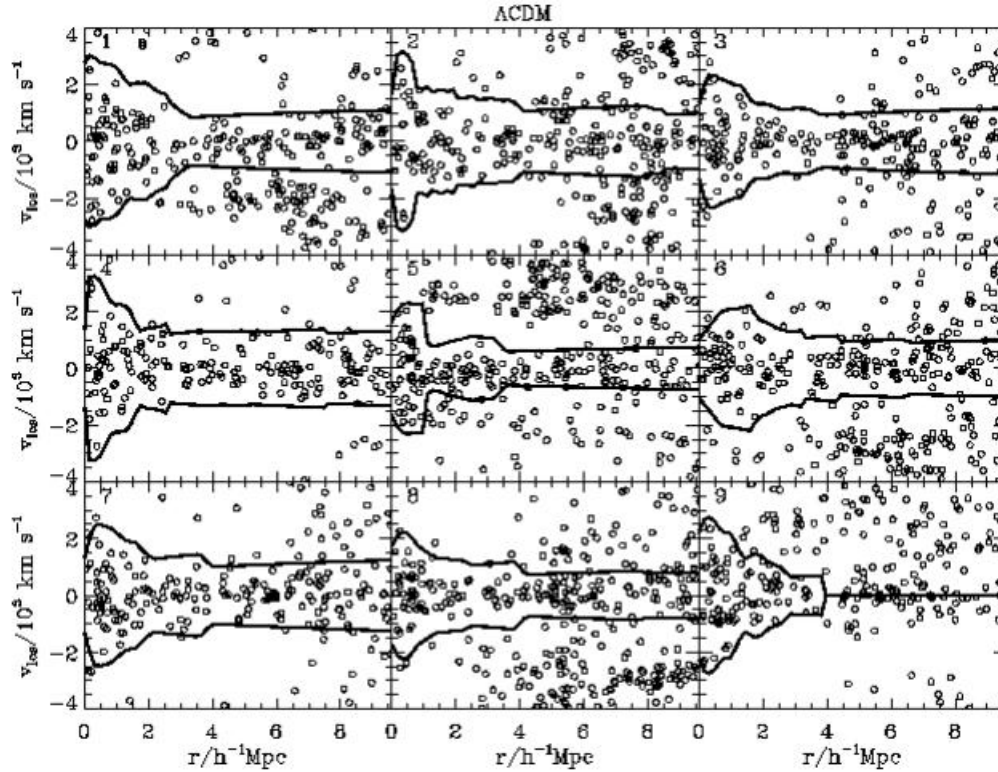


FIGURA 3.4: Diagramas de Redshift em um universo Λ CDM de um aglomerado visto em nove linhas de visada diferentes. Os círculos representam as galáxias. As linhas pretas são representações das cáusticas (Diaferio, 1999).

Dessa forma, calculamos a massa dentro de uma esfera de raio r ; a partir da velocidade observada $v_{esc}^2(r')$, no qual r' é o raio projetado. \mathcal{F}_β é uma função que depende da densidade ρ , do potencial ϕ e do perfil da anisotropia projetada β ; em geral, ela é aproximada como uma constante e calibrada por simulações - por isso podemos colocá-la fora da integral. Mais detalhes são descritos em Diaferio & Geller (1997).

A desvantagem desse método é que precisamos dos redshifts das galáxias, ou seja, precisamos de dados observacionais que nem sempre são fáceis de serem obtidos, além da necessidade de uma amostra robusta para que não tenhamos resultados enviesados. Outra desvantagem da utilização do espaço de fase em métodos dinâmicos é a existência de galáxias de fundo e na linha de visada, que podem enviesar também os resultados. Subestruturas presentes nos aglomerados também podem afetar a análise.

Capítulo 4

As Amostras

Neste capítulo apresentaremos as amostras que foram utilizadas neste trabalho. Utilizamos dois tipos de amostras: uma observada e duas simuladas. A amostra observada são dados do SDSS (Sloan Digital Sky Survey) e as amostras simuladas vêm de duas simulações diferentes: da Simulação Millennium e da Simulação EAGLE. A seguir, falaremos mais detalhadamente dessas amostras.

4.1 A Amostra Observada

4.1.1 SDSS

O levantamento conhecido como SDSS é o maior levantamento multi-filtros e de redshift espectroscópico até o momento. O SDSS utiliza um telescópio óptico de 2,5 m localizado no Apache Point Observatory no Novo México. O nome é em homenagem a Alfred P. Sloan Foundation, que contribuiu de modo significativo financeiramente. O levantamento cobre um terço do céu e possui espectroscopia de três milhões de objetos astronômicos. O SDSS está no seu décimo terceiro lançamento de dados e possuiu diversos projetos associados.

4.1.1.1 SDSS-I

O SDSS-I foi feito de 2000 a 2005, em seus 5 primeiros anos de operação ele imageou mais de 8000 graus quadrados do céu em 5 bandas do óptico, e obteve o espectro de mais de 700.000 objetos celestes.

4.1.1.2 SDSS-II

Em 2005 o levantamento entrou em uma nova fase, no qual as observações foram estendidas para observar a Via Láctea. Assim, foram feitos 3 levantamentos: o Sloan Legacy Survey, o Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration (SEGUE-1) e o Sloan Supernova Survey.

- *Sloan Legacy Survey*: O levantamento feito de 2000 a 2008 cobriu mais de 7.500 graus quadrados, e obteve dados de mais de 2 milhões de objetos, além de espectros de quase um milhão de galáxias e mais de 120.000 quasares. Estes dados possibilitaram o estudo de vastas áreas da ciência, que vai desde o estudo de asteroides até estruturas em larga escala do universo.
- *Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration 1*: O objetivo principal deste levantamento foi o estudo da cinemática e das populações estelares de altas latitudes do disco espesso e do halo da Via Láctea. Ele obteve o espectro de cerca de 240.000 estrelas com o objetivo de criar um mapa da Via Láctea. Os dados do SEGUE-1 nos deram pistas importantes sobre estrutura, formação e evolução da nossa Galáxia.
- *Sloan Supernova Survey*: De 2005 a 2008 houve o imageamento do céu em uma faixa ao longo do equador celeste. O projeto descobriu mais de 500 supernovas do tipo Ia, o que possibilitou um entendimento mais profundo sobre a história do Universo.

4.1.1.3 SDSS-III

De 2008 a 2014, foram feitos melhoramentos nos espectrógrafos e foram adicionados mais 2 instrumentos para fazer 4 novos levantamentos. São eles: APOGEE, BOSS, MARVELS e SEGUE-2.

- *Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*: O APOGEE se focou na estrutura e evolução da Via Láctea usando espectroscopia no infravermelho de alta resolução.
- *Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*: O BOSS teve como objetivo em mapear o Universo em larga escala, criando um mapa tridimensional com grande volume de galáxias vermelhas luminosas e quasares, a fim de estimar a escala característica relacionada às oscilações acústicas de bárions no Universo primordial.
- *Multi-Object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey*: O MARVELS procurou por estrelas próximas, a fim de encontrar evidências de exoplanetas ao redor delas.
- *Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration 2*: O SEGUE-2 teve como objetivo analisar a estrutura e evolução da Via Láctea, continuando o levantamento feito pelo SEGUE-1.

4.1.1.4 SDSS-IV

O planejamento é que os levantamentos do SDSS-IV fossem feitos de 2014 a 2020. Os levantamentos que estão sendo feitos são: APOGEE-2, eBOSS e MaNGA.

- *Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment 2*: O APOGEE-2 é um levantamento espectroscópico de estrelas da Via Láctea. Entre as questões principais estão: qual é a história de formação estelar e enriquecimento químico da Via Láctea? Qual é a dinâmica do disco, do bojo e do halo da Via Láctea? Estrelas que possuem planetas em órbita possuem propriedades diferentes quando comparadas a estrelas sem planetas?
- *Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*: O eBOSS vai investigar a história de expansão do Universo dentro de 80% da história cósmica, e também vai investigar a natureza da energia escura. Entre as questões principais a serem respondidas estão: Como ocorre a transição da desaceleração para a aceleração? Isto é consistente com as teorias de energia escura existentes?

- *Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory*: O MaNGA vai explorar em detalhes as estruturas internas de cerca de 10.000 galáxias utilizando espectroscopia espacial.

4.1.2 Os Dados

A amostra observada é composta de 127 aglomerados da versão suplementar do NoSOCS (Northern Sky Optical Cluster Survey) e 56 aglomerados do CIRS (Cluster Infall Regions in SDSS). NoSOCS é um catálogo de galáxias construído a partir de uma versão digitalizada do Second Palomar Observatory Sky Survey (POSS-II; DPOSS, Djorgovski et al., 2003). O CIRS é um catálogo de aglomerados massivos de baixo redshift detalhado em Rines & Diaferio (2006).

Os dados (espectroscopia e fotometria) utilizados para o catálogo NoSOCS foram retirados do quinto lançamento do SDDS. A versão suplementar do NoSOCS possui 9956 candidatos a aglomerados (Lopes et al., 2004). Houve um refinamento do catálogo NoSOCS original descrito em Lopes et al. (2009a), que nos deixa com 127 aglomerados finais que são aqui utilizados.

O catálogo suplementar possui poucos sistemas de alta massa, pois cobre uma pequena parte do céu, comparada ao SDDS como um todo. Este subconjunto está em baixo desvio para o vermelho ($z < 0,1$) e possui espectroscopia completa no SDSS DR5, usado à época. Para suprir este problema, também foram adicionados aglomerados do CIRS, como mencionado anteriormente. A amostra de Rines & Diaferio (2006) continha 74 aglomerados selecionados por raios-X. Sete aglomerados desta amostra são comuns a amostra NoSOCS. Três foram excluídos por estarem muito próximos e ocuparem uma área angular muito alta. Após refinamento do redshift espectroscópico, 7 sistemas foram eliminados por não possuírem uma amostragem considerável dentro de $2,5 h^{-1}$ Mpc. Um aglomerado foi excluído porque o novo redshift calculado utilizando SDDS DR6 teve uma alta divergência do redshift anteriormente encontrado, além disso o redshift desta aglomerado era muito baixo ($z= 0,0139$). Ficamos assim com os 56 aglomerados do CIRS.

Os dados que utilizamos neste trabalho são a ascensão reta, a declinação e o redshift espectroscópico das galáxias. As tabelas a seguir mostram os dados para 20 aglomerados (tabela 4.1) e 20 galáxias como exemplo (tabela 4.2).

TABELA 4.1: Dados dos aglomerados obtidos do SDSS.

Identificador do Aglomerado	RA (J2000)	DEC (J2000)	z_{\odot}	$M_{200}(10^{14}M_{\odot})$	$\sigma(kms^{-1})$	$R_{200}(Mpc)$
NSCS J121847+484410	184.67720	+48.72197	0.0448	0.36	179.9	0.67
NSCS J011502+002441	018.75351	+00.37955	0.0449	3.63	474.6	1.45
NSCS J100242+324218	150.67372	+32.70033	0.0505	1.45	376.1	1.07
NSCS J144860+111432	222.22980	+11.25967	0.0520	2.19	391.2	1.22
NSCS J102133+362847	155.35622	+36.37101	0.0533	0.63	177.4	0.81
NSCS J125448+530423	193.66379	+53.09137	0.0546	1.08	296.5	0.97
NSCS J143650+095714	219.17287	+09.95229	0.0551	1.02	217.2	0.95
NSCS J013740-002308	024.35077	-00.45362	0.0559	0.59	187.5	0.79
NSCS J131807+470324	199.48590	+47.07273	0.0564	1.51	288.3	1.08
NSCS J110721+030045	166.83276	+03.00255	0.0581	0.13	142.2	0.48
NSCS J131736+471849	199.43626	+47.34002	0.0582	3.09	422.6	1.37
NSCS J002924-001242	007.33877	-00.19785	0.0596	1.98	361.0	1.18
NSCS J134950+384654	207.43005	+38.77051	0.0617	0.20	93.5	0.55
NSCS J121054+564110	182.67600	+56.71158	0.0629	0.41	161.5	0.70
NSCS J151902+450343	229.77095	+45.05363	0.0636	1.03	271.6	0.95
NSCS J120756+562705	181.95589	+56.47800	0.0643	0.33	161.0	0.65
NSCS J104253+123141	160.70189	+12.51036	0.0650	1.90	360.4	1.16
NSCS J153439+314219	233.67285	+31.69068	0.0654	1.55	314.1	1.09
NSCS J121234+453749	183.12746	+45.64881	0.0658	0.21	165.6	0.56
NSCS J005544+003812	013.92629	+00.63139	0.0667	2.05	386.8	1.19

TABELA 4.2: Dados das galáxias obtidos do SDSS - possíveis membros do aglomerado J011502+002441.

RA (J2000)	DEC (J2000)	z_{spec}
1.24251	0.97998	0.0948
1.24413	0.96208	0.0953
1.24904	1.07195	0.1142
1.25013	0.348661	0.0942
1.25017	0.42368	0.0945
1.25708	0.85076	0.0984
1.25738	0.99574	0.1004
1.26038	0.30553	0.0844
1.26133	0.89296	0.1000
1.26187	1.14639	0.1813
1.26708	0.39848	0.1051
1.26826	0.38291	0.0947
1.26855	0.57109	0.3194
1.26890	0.94369	0.1006
1.27272	0.46265	0.0867
1.27728	1.06968	0.3621
1.28330	0.95954	0.0851
1.29306	0.46809	0.0850
1.29380	0.09457	0.1385
1.29761	0.97236	0.3626

4.2 A Amostra Simulada

Com o avanço dos recursos computacionais, tornou-se possível testar modelos através de simulações. No contexto da astrofísica e da cosmologia, inserem-se as simulações cosmológicas, que fazem ser possível a comparação do observado com o que é esperado pelos modelos. Dentre essas simulações estão as que utilizamos, que são as simulações Millennium e EAGLE.

4.2.1 Simulação Millennium

A Simulação Millennium é uma simulação cosmológica de N-corpos que visa reproduzir a evolução de matéria escura no universo. Ela é composta de 10^{10} partículas em uma região cúbica de $500 h^{-1}$ Mpc, com $5 h^{-1}$ kpc de resolução. Ela é baseada no modelo cosmológico padrão Λ CDM. A figura 4.1 ilustra a formação de estruturas no universo pela Simulação Millennium.

A vantagem da Simulação Millennium é que sua região cúbica é muito abrangente comparada com outras simulações. Isso permite que haja um número maior de halos massivos a serem considerados, de acordo com a formação hierárquica de estruturas. Comparada com a Simulação EAGLE, por exemplo, ela possui um número maior de halos massivos a serem analisados, ou seja, um número maior de aglomerados massivos.

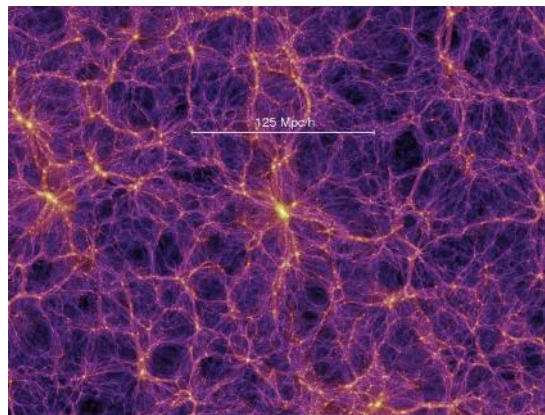


FIGURA 4.1: Imagem Ilustrativa da Simulação Millennium, retirada do site onde se encontra a base de dados: <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>.

Um modelo semi-analítico foi aplicado aos dados do Millennium para que o catálogo astrofísico pudesse ser gerado, já que a simulação em si só trata de partículas de matéria

escura. Os detalhes deste procedimento estão descritos na tese de doutorado de Duarte 2014. De forma que a completeza se trata de $\text{mag} = 17,78$ e $z = 0,1$. O catálogo foi cedido pelo Dr. Gary Mamon.

Ficamos assim com 843 aglomerados finais e um total de 800144 galáxias. Assim como para a amostra observada, utilizamos a ascensão reta, declinação e redshift das galáxias da simulação. A transformação das coordenadas cartesianas da simulação para o sistema equatorial de coordenadas é melhor detalhado na tese do Manuel Duarte (2014), no qual

$$\alpha = \begin{cases} \arctan2(Y, X) + 2\pi & \text{se } Y \geq 0 \\ \arctan2(Y, X) & \text{se } Y \leq 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\delta = \text{sgn}(Z) \arccos\left(\frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}\right). \quad (4.2)$$

Assim como a amostra observada, temos tabelas com dados dos aglomerados e das galáxias (tabelas 4.3 e 4.4).

TABELA 4.3: Dados dos aglomerados obtidos da Simulação Millennium.

Identificador do Aglomerado	RA (J2000)	DEC (J2000)	z_{spec}	$\log(M_{200})$	$\sigma(kms^{-1})$	$R_{200}(Mpc)$
1407463457941101	182.39999	9.85000	0.0924	12.956	269.1	0.33
1420209791966679	157.25000	37.70000	0.0976	12.846	242.9	0.30
1431614433991809	142.30000	18.89999	0.0929	13.524	190.6	0.51
1601341995369017	246.32618	24.97999	0.0952	14.210	326.6	0.86
1601341998346279	244.44999	30.37000	0.0942	13.246	291.2	0.41
1613417494371751	232.77999	45.38000	0.0846	13.558	209.2	0.52
1625492987398715	187.75000	37.20000	0.0594	13.989	310.0	0.73
1636897607422549	148.19400	19.29999	0.0587	13.421	285.6	0.48
1636897610421013	173.00000	15.89999	0.0683	12.788	268.4	0.29
1649643952447846	129.50000	30.71999	0.0690	13.304	194.5	0.43
1650314778448625	140.97999	49.09999	0.0950	13.106	254.0	0.37
1818700628801884	247.61999	27.81999	0.0931	13.858	476.3	0.66
1866331730900497	120.16853	35.16999	0.0527	13.217	352.3	0.41
1867002577901284	112.20668	38.76107	0.0625	13.440	330.5	0.48
1854256261878568	114.02428	40.88724	0.0240	13.560	396.4	0.53
1867002550901243	114.40814	37.84731	0.0790	14.131	371.2	0.81
1854927108877567	115.66769	46.89790	0.0459	13.721	311.4	0.60
1854256234875069	116.19023	29.54683	0.0314	13.943	302.4	0.72
1867002561902144	116.67540	37.16371	0.0800	13.302	262.9	0.43
1866331717899882	116.73728	18.13095	0.0744	13.155	365.0	0.39

TABELA 4.4: Dados das galáxias obtidos da Simulação Millennium.

z_{spec}	RA (J2000)	DEC (J2000)	ID
0.2358	2.81750	0.84768	1000251402088980
0.2382	2.81750	0.84811	1000251402088980
0.2395	2.81809	0.84731	1000251402088980
0.2410	2.81674	0.84730	1000251402088980
0.2346	2.81759	0.84880	1000251402088980
0.2377	2.81903	0.84852	1000251402088980
0.2594	2.74741	0.89812	1000251402124605
0.2609	2.73371	0.89378	1000251405090340
0.2628	2.83722	0.91449	1000251408091993
0.2656	2.92450	0.85842	1000251411091830
0.2688	2.92443	0.85821	1000251411091830
0.2765	2.79567	0.83825	1000251414090921
0.2687	2.93027	0.84778	1000251419091498
0.2653	2.93222	0.84824	1000251419091498
0.2677	2.92947	0.84604	1000251419091498
0.2483	2.79445	0.88218	1000251421092872
0.2483	2.79422	0.88060	1000251421092872
0.2605	2.86046	0.92722	1000251425092493
0.2465	2.80056	0.87426	1000251429089859
0.2561	2.73663	0.91523	1000251431089027

4.2.2 Simulação EAGLE

A Simulação EAGLE (Evolution and Assembly of Galaxies and their Environments) é uma simulação hidrodinâmica cosmológica com o intuito de entender como as galáxias se formam e evoluem. Seu tamanho espacial é de 100 Mpc - menor que a Simulação Millennium. Na figura 4.2 podemos observar a formação de estruturas utilizando-se a Simulação EAGLE - é válido notar uma similaridade com a figura 4.1, como esperado.

A vantagem da Simulação EAGLE é a sua alta resolução comparada com as outras simulações cosmológicas. Em compensação, como já foi dito anteriormente, seu tamanho é menor que a da Simulação Millennium, então esperamos encontrar menos aglomerados mais massivos.

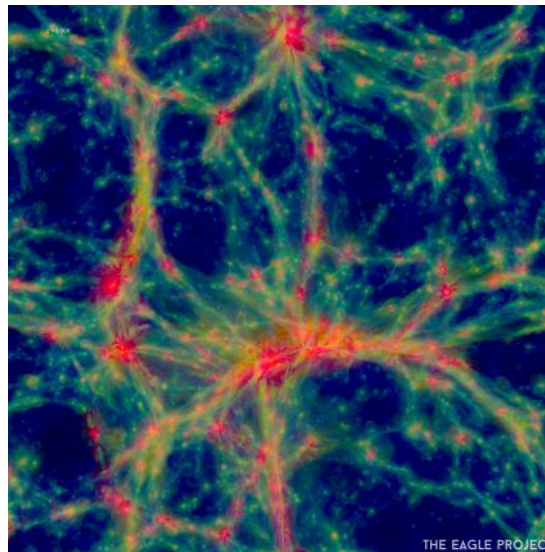


FIGURA 4.2: Imagem Ilustrativa da Simulação EAGLE, retirada do site onde se encontra a base de dados.

Através da base de dados online, baixamos dados de aglomerados e de galáxias em 3 diferentes "snapshots" ou seja, em diferentes redshifts (redshifts em torno de 0,0; 0,5 e 1,0). Dessa forma, temos a possibilidade de estudarmos a eficácia dos métodos de estimar massas em diferentes redshifts. Através de uma pesquisa em SQL é possível fazer download dos dados na base de dados online. Observe a figura 4.3.

Em redshift cosmológico igual a 0,0, temos 717 aglomerados e 396538 galáxias. No redshift cosmológico igual a 0,5, temos 706 aglomerados e 322049 galáxias. Utilizando-se o redshift cosmológico como 1,0 temos 658 aglomerados e 373301 galáxias. Assim

FIGURA 4.3: Interface gráfica para fazer download da amostra simulada.

como feito com a Simulação Millennium, transformamos as coordenadas cartesianas em coordenadas equatoriais, de forma que:

$$\alpha = \text{atan}(Y/X) + \pi, \quad (4.3)$$

$$\delta = \text{asin} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}. \quad (4.4)$$

As equações de transformação do sistema coordenadas cartesianas para o sistema de coordenadas equatoriais são diferentes para as duas simulações, isso ocorre porque os eixos cartesianos das duas simulações são definidos de forma diferente. A primeira tabela a seguir representa os dados dos grupos formados pelo método de Friends-of-Friends (FOF) utilizando-se a Simulação EAGLE, para $z \approx 0$. Originalmente a tabela possui 717 aglomerados, por ser uma amostra muito extensa colocamos os dados referentes a apenas 20 aglomerados. A segunda tabela são as informações referentes a 20 subhalos (no total temos 396538 subhalos) utilizados, ou seja, as galáxias da Simulação EAGLE em z_0 . Além disso, temos também uma tabela similar a esta para diferentes redshifts no qual temos também $z_{0,5}$ e $z_{1,0}$.

TABELA 4.5: Dados dos aglomerados obtidos da base de dados da Simulação EAGLE no qual $z \approx 0$.

Identificador do Grupo	z_{cosm}	X (cMpc)	Y (cMpc)	Z (cMpc)	$M_{200}(10^{14}M_{\odot})$	R_{200} (Mpc)	Número de Subhalos
28000000000000	2.220446E-16	17.10851	79.76777	52.71782	1.87	1205.52	17982
28000000000001	2.220446E-16	5.56324	75.68730	47.83339	3.73	1518.19	19672
28000000000002	2.220446E-16	8.86548	35.28427	54.43199	3.00	1411.31	10366
28000000000003	2.220446E-16	52.79975	4.91971	20.06351	3.07	1422.00	8670
28000000000004	2.220446E-16	78.16542	77.17844	42.56526	1.96	1224.92	7606
28000000000005	2.220446E-16	76.67051	89.47417	41.88466	1.98	1229.49	6381
28000000000006	2.220446E-16	61.72258	33.29621	20.65763	1.30	1068.31	6459
28000000000007	2.220446E-16	72.44746	28.80730	26.80230	0.92	953.47	3471
28000000000008	2.220446E-16	84.92193	47.61311	7.97358	0.93	957.98	3145
28000000000009	2.220446E-16	87.67132	50.57879	4.69291	0.95	964.66	3304
28000000000010	2.220446E-16	54.30100	96.47962	20.33400	0.75	890.31	2783
28000000000011	2.220446E-16	12.23517	77.32660	46.18866	0.78	901.22	2556
28000000000012	2.220446E-16	76.82272	61.86165	70.92750	0.62	835.15	2587
28000000000013	2.220446E-16	34.86958	78.01726	61.25996	0.47	763.11	3039
28000000000014	2.220446E-16	69.25912	81.33884	87.38214	0.60	827.91	2726
28000000000015	2.220446E-16	37.35854	44.81594	97.18042	0.74	887.61	2138
28000000000016	2.220446E-16	67.80538	3.14152	98.98222	0.48	768.88	2649
28000000000017	2.220446E-16	33.76301	66.14211	9.38396	0.67	857.92	1834
28000000000018	2.220446E-16	74.35766	5.39728	76.63617	0.56	810.23	2474
28000000000019	2.220446E-16	13.44464	77.81575	49.80885	0.58	815.93	1888
28000000000020	2.220446E-16	82.39742	13.17014	57.86228	0.57	813.26	1807

TABELA 4.6: Dados das galáxias obtidos da base de dados da Simulação EAGLE no qual $z \approx 0$.

Identificador da Galáxia	Identificador do Grupo	z_{cosm}	X (cMpc)	Y (cMpc)	Z (cMpc)	$V_x(kms^{-1})$	$V_y(kms^{-1})$	$V_z(kms^{-1})$
50288243	28002200006667	2.220446E-16	61.95268	80.55395	73.35725	197.04567	81.57355	-242.28375
50288278	28002200006668	2.220446E-16	65.59106	82.05927	81.43769	188.78297	-105.17172	53.49693
50288304	28002200006669	2.220446E-16	69.89603	85.97169	78.45397	104.88801	-95.85332	18.40181
50288328	28002200006670	2.220446E-16	68.69238	79.66690	83.19826	208.35144	10.22561	147.78618
50288350	28002200006671	2.220446E-16	67.87034	84.36449	88.50155	-24.36057	-386.98990	-9.70672
50288393	28002200006672	2.220446E-16	67.12328	76.82397	91.09508	259.64090	155.36475	14.019288
50288435	28002200006673	2.220446E-16	65.69247	72.51191	93.17078	109.91025	-12.45030	-41.95715
50288465	28002200006674	2.220446E-16	57.54063	71.33098	77.34041	170.48831	13.76595	-80.88154
50288498	28002200006675	2.220446E-16	67.37741	63.25937	85.37783	178.18198	-51.38808	0.73598
50288532	28002200006676	2.220446E-16	73.74276	59.62631	75.38430	157.55019	-17.06543	-318.00357
50288572	28002200006677	2.220446E-16	63.56977	61.55559	93.71461	135.78818	58.65871	-66.09572
50288597	28002200006678	2.220446E-16	41.63022	52.22263	0.10918	54.30818	-239.18991	136.02539
50288636	28002200006679	2.220446E-16	47.33073	85.70792	91.23079	84.92444	82.37456	53.29478
50288662	28002200006680	2.220446E-16	50.42177	96.82434	4.94712	193.82031	227.34622	212.25867
50288707	28002200006681	2.220446E-16	48.79598	0.923807	2.46378	59.93180	36.81400	381.04520
50288740	28002200006682	2.220446E-16	36.19979	90.46025	91.78302	289.92566	108.59474	-204.48628
50288789	28002200006683	2.220446E-16	28.22472	92.33379	61.56977	-142.67595	-216.35146	-127.09686
50288809	28002200006684	2.220446E-16	21.60591	79.28134	59.13843	-262.55190	238.39534	-813.61390
50288837	28002200006685	2.220446E-16	29.84808	77.89631	58.16400	-368.35342	50.11811	-69.94736

Capítulo 5

Desenvolvimento

Aplicamos dois métodos para estimar a massa dos aglomerados de galáxias: o Método da Cáustica e o Método do Virial. No capítulo 3 falamos sobre tais métodos de uma maneira mais geral, agora seremos mais específicos com relação aos detalhes de cada método.

Este capítulo tem o objetivo de detalhar o trabalho prático que foi realizado durante a aplicação dos métodos. Dividimos o capítulo em dois itens principais: o método da cáustica e a análise do virial.

5.1 O Método da Cáustica

5.1.1 A Técnica

A técnica consiste em três passos majoritários: (1) a construção de uma árvore binária baseada na energia de cada par de galáxias; (2) a determinação de um limite para cortar a árvore binária; e (3) a identificação do centro do aglomerado para obter o diagrama de redshift e determinar densidade numérica de galáxias neste diagrama (Diaferio, 1999; Diaferio & Geller, 1997; Serra & Diaferio, 2013).

O primeiro passo é construir uma árvore binária baseada na energia de cada par de galáxias segundo a equação 5.1.

$$E_{ij} = -G \frac{m_i m_j}{R_p} + \frac{1}{2} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \Pi^2 \quad (5.1)$$

No qual R_p é a separação projetada do par, Π é a diferença de velocidades na linha de visada, e $m_i = m_j = 10^{12} h^{-1} M_\odot$ são as massas que assumimos constantes, isso é feito também em Diaferio (1999); Serra et al. (2011). Variações nesta massa geram mudanças nos detalhes da árvore binária, porque elas dão diferentes pesos para $R_{p|}$ e Π . Entretanto, no intervalo de $(10^{11}, 10^{13}) h^{-1} M_\odot$, a localização do centro e os membros do aglomerado se mantêm inalterados. As incertezas no método da cáustica são dominadas por efeitos de projeção (Serra et al., 2011).

Cada galáxia inicialmente representa um grupo, o conjunto total tem N grupos. É feita a combinação dois a dois de todas as energias possíveis. Os dois grupos que correspondem a energia mínima se transformam em um grupo só e assim temos N-1 grupos. Isso é feito até que se atinja um único grupo. A figura 5.1 representa a árvore binária, e a figura 5.2 exhibe as coordenadas celestes de um aglomerado exemplo da amostra observada.

O próximo passo é cortar a árvore binária. A árvore arranja as galáxias em grupos em potencial; porém precisamos de um corte para efetivar esses grupos. A partir deste nó escolhido, sairão os possíveis membros do aglomerado - que não são os mesmos membros obtidos pela cáustica. Assim, identificamos o ramo principal: o ramo que parte da raiz e que contém os nós dos quais saem o maior número de folhas; no qual cada nó x possui uma dispersão de velocidade associada σ_{los}^x . Seguindo pelo ramo principal saindo da raiz, temos uma diminuição de σ_{los}^x , pois há uma diminuição de galáxias não associadas ao aglomerado. Até que σ_{los}^x atinge um plateau em um nó x_1 , observe a Figura 5.3. Boa parte das galáxias que estão associadas a este nó são membros do aglomerado, coerente com a ideia de que o sistema é aproximadamente isotérmico. A segunda diminuição de σ_{los}^x se deve a subestruturas do aglomerado, e então, um novo corte é feito.

Assim, o primeiro corte feito corresponde a primeira estimativa de possíveis membros do aglomerado. As galáxias que saem do nó correspondente a x_1 são as que consideraremos membros para estimar o centro do aglomerado, a distância ao centro das galáxias e suas dispersões de velocidades. E, com essas quantidades, podemos construir o diagrama de redshift como na Figura 5.4.

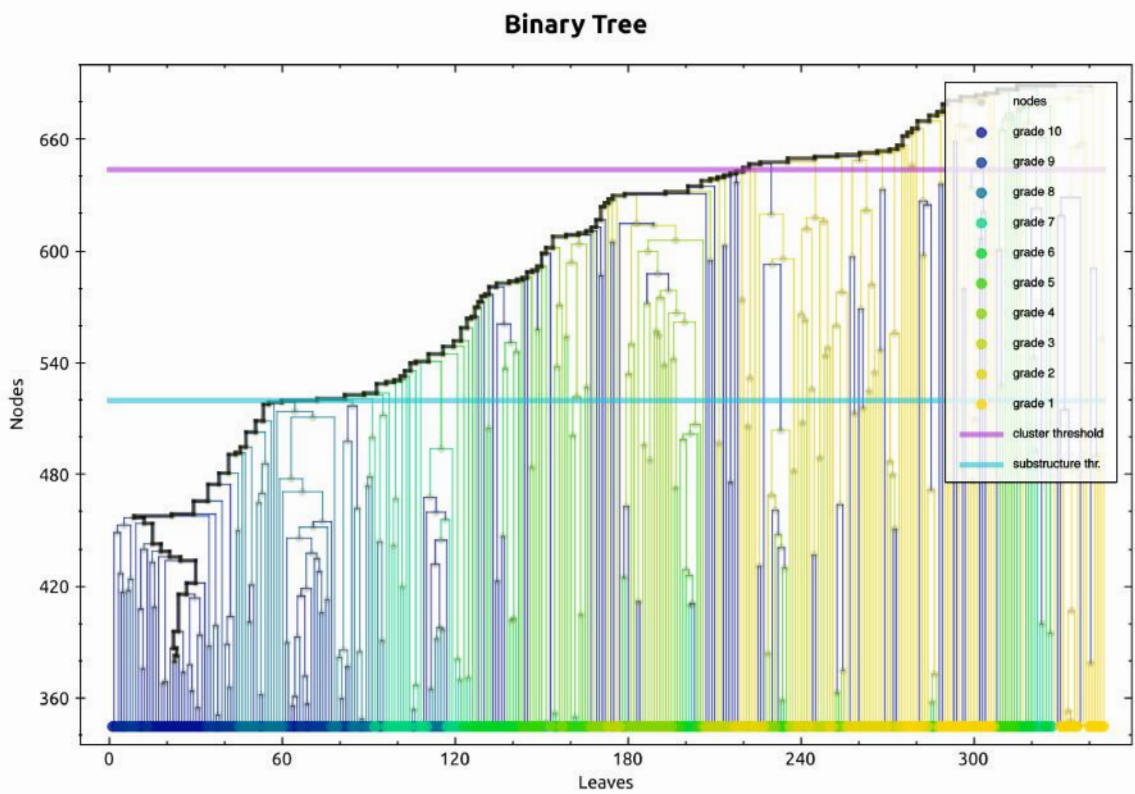


FIGURA 5.1: Dendrograma que representa a árvore binária de um aglomerado exemplo da amostra observada. As galáxias são as folhas da árvore na base do gráfico. O caminho espesso indica o ramo principal da árvore. A linha em violeta indica o corte feito devido aos limites do aglomerado e a linha em azul indica o corte feito devido às subestruturas. Essas linhas são os cortes que obtivemos a partir do "σ plateau", como mostra a figura 3.

O próximo passo é localizar a cáustica no diagrama de redshift - curva violeta na Figura 5.4. Através da localização das galáxias no diagrama de redshift, podemos estimar o parâmetro κ . As cáusticas são curvas que satisfazem a equação $f_q(r, v) = \kappa$, sendo $f_q(r, v)$ a densidade numérica de galáxias no diagrama de redshift - ou plano (r, v) . No qual é a raiz da equação

$$\langle v_{esc}^2 \rangle_{\kappa, R} = 4 \langle v^2 \rangle \tag{5.2}$$

e a função $\langle v_{esc}^2 \rangle_{\kappa, R} = \int_0^R A_\kappa^2(r) \phi(r) dr / \int_0^R \phi(r) dr$ é a amplitude média da cáustica dentro de R , $\phi(r) = \int f_q(r, v) dv$, $\langle v^2 \rangle^{1/2}$ é a dispersão de velocidade dos candidatos a membros, R é a separação projetada deles ao centro e q é o parâmetro de suavização. A figura 5.4 é o resultado deste procedimento no diagrama de redshift. Assim, os membros finais são os que estão internos a cáustica. A estimacão de massa é imparcial quando se utiliza a localizaco da cáustica, porém é enviesada em pelo menos

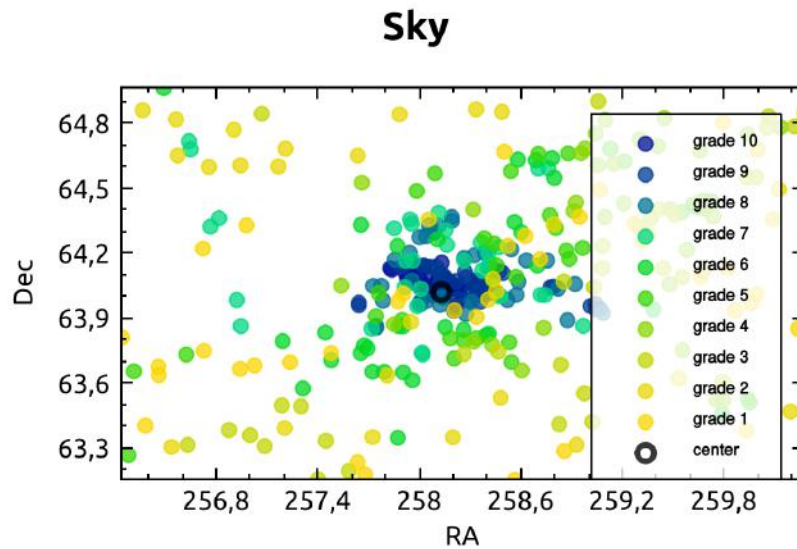


FIGURA 5.2: Coordenadas celestes do aglomerado exemplo. As cores representam o mesmo da figura 5.1.

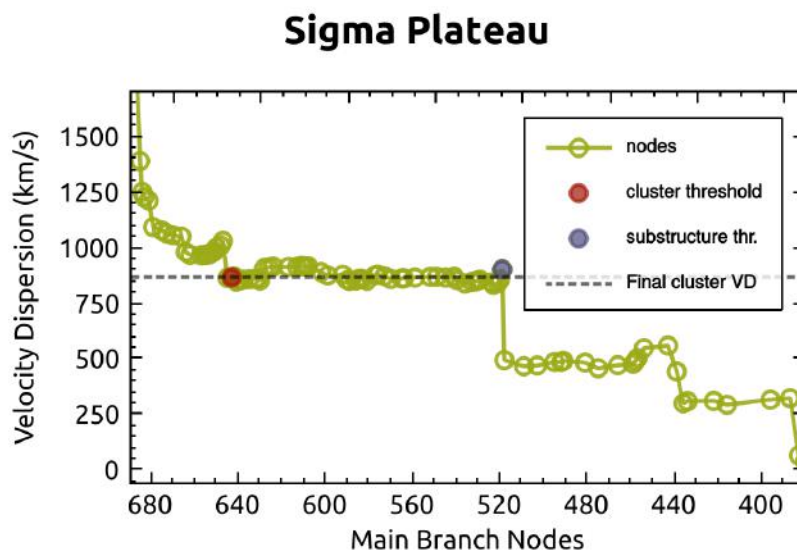


FIGURA 5.3: Dispersão de velocidades das folhas de cada nó ao longo do ramo principal da árvore binária. O ponto vermelho indica o nó onde há o corte devido aos limites do aglomerado, e o ponto azul indica o corte devido às subestruturas. A linha tracejada indica a dispersão de velocidades ao longo da linha de visada das galáxias dentro de uma esfera de $3R_{200}$.

20% quando consideramos os membros como o grupo principal da árvore binária (Serra & Diaferio, 2013).

A figura 5.5 mostra o perfil de massa obtida para o mesmo aglomerado modelo das figuras anteriores deste capítulo.

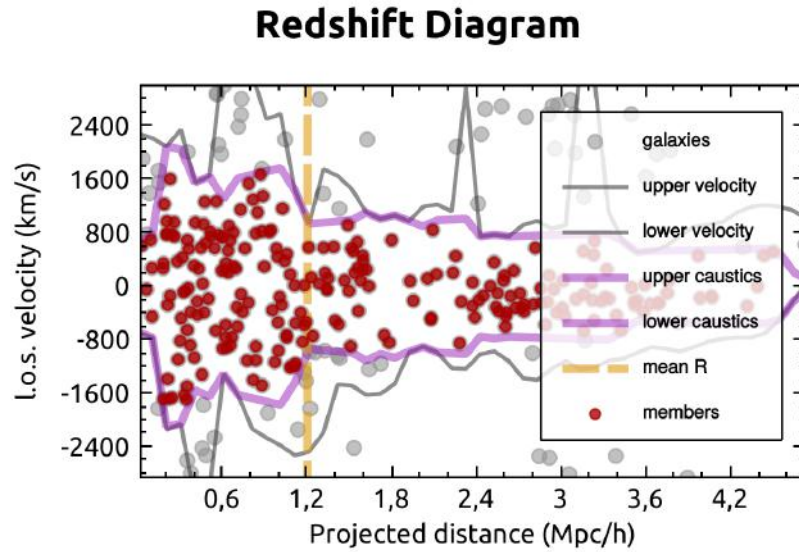


FIGURA 5.4: Diagrama de redshift para o mesmo aglomerado exemplo das figuras anteriores. A linha violeta indica a cáustica localizada com o método da cáustica. Os pontos vermelhos indicam os membros e os pontos cinzas indicam os que não são membros do aglomerado pela técnica.

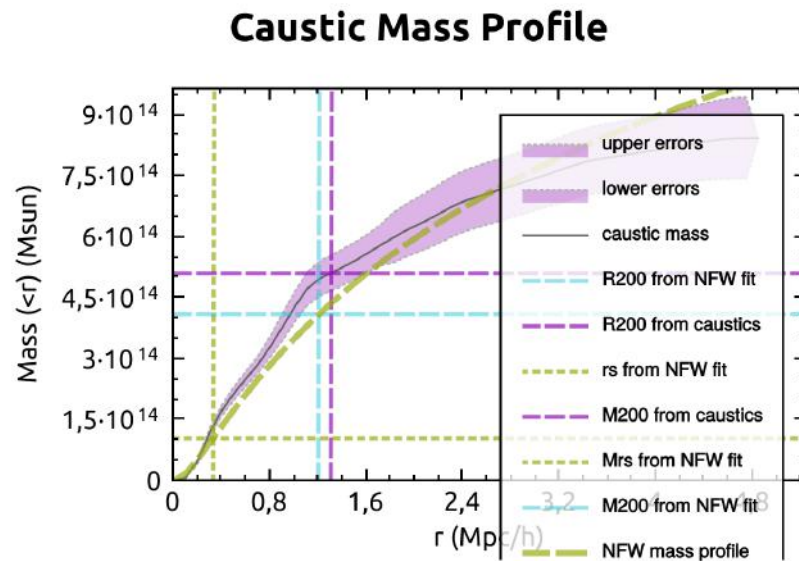


FIGURA 5.5: Perfil de Massa Obtidos pela Técnica da Cáustica.

5.1.2 A Aplicação

O método da cáustica foi aplicado utilizando-se o programa nomeado de CausticApp, versão 1.7, feito e cedido pela Dra. Ana Laura Serra (Serra et al., 2011). O programa requer que entremos com uma tabela com algumas informações fundamentais, que são RA (Ascensão Reta), DEC (declinação) e z (redshift) de cada galáxia que possivelmente pertence ao aglomerado correspondente a esta tabela. Ou seja, temos

TABELA 5.1: Tabela de entrada para o CausticApp.

RA (J2000)	DEC (J2000)	z
4.50995	0.55059	0.0029
4.51342	0.55886	0.0002
4.48394	0.56873	0.0028
4.48546	0.59389	0.0032
4.48544	0.59362	0.0032
4.52031	0.60342	0.0022
4.53584	0.56215	0.0014
4.50585	0.55738	0.0040
4.48416	0.56352	0.0020
4.51063	0.59831	0.0022
4.50260	0.57321	0.0030
4.49639	0.57555	0.0040
4.50313	0.57196	0.0028
4.50030	0.57584	0.0047
4.49966	0.57309	0.0064
4.50051	0.57746	0.0064
4.49968	0.58195	0.0022
4.50238	0.57518	0.0032
4.50215	0.57383	0.002
4.52207	0.58524	0.0020

uma tabela para cada aglomerado, com informações acerca dos possíveis candidatos a membros. Além disso, podemos inserir na primeira linha do arquivo informações sobre o aglomerado que podem ser utilizadas ou não pelo método. Podemos adicionar o centro do aglomerado em RA e DEC, e também o redshift do aglomerado; mas esses dados são opcionais. Observe a tabela 5.1, ela mostra os dados para um aglomerado exemplo que foi utilizado. Este arquivo possui informação de 9012 galáxias, porém só exibimos aqui a tabela para as primeiras 20 galáxias do arquivo.

Como saída, o programa nos retorna 9 arquivos mais alguns gráficos que contêm informações sobre o aglomerado e os candidatos a membros. Os arquivos de saída são:

- **.clust**: arquivo ASCII contendo o centro, a dispersão de velocidades e a distância do aglomerado.
- **.epairs**: arquivo binário contendo a energia de ligação de cada possível par no catálogo; necessário para construir a árvore binária.
- **.tree**: arquivo binário que contém a árvore binária.

- **.group**: arquivo binário que contém os grupos detectados pela árvore binária - uma vez que ela foi cortada.
- **.subs**: arquivo binário que contém informações sobre as subestruturas encontradas a partir da árvore binária.
- **.red-diag**: arquivo binário que contém o diagrama de redshift; contém somente galáxias dentro do corte de sigma.
- **.diag-full**: diagrama de redshift completo, v_{los} e R_p .
- **.memb**: os membros, em formato RA[i], DEC[i], z[i], R_p [i], v_{los} .
- **.mprof**: perfil de massa.

O programa nos retorna alguns gráficos relacionados ao método da cáustica, que são os gráficos 5.1 a 5.5. A partir do perfil de massa gerado no arquivo `.mprof` podemos inferir M_{200} dos aglomerados já que a partir das equações de Freedman, temos

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (5.3)$$

Como queremos M_{200} , que é a massa no raio no qual a densidade é 200 vezes a densidade crítica do universo, podemos usar que

$$200\rho_c = \frac{M_{200}}{\frac{4}{3}\pi R_{200}^3}. \quad (5.4)$$

Este subconjunto está em baixo desvio para o vermelho ($z \lesssim 0.1$) e possui espectroscopia completa no SDSS DR5, usado à época. A dispersão de velocidades é retirada do arquivo `.clust`.

5.2 A Análise do Virial

5.2.1 A Técnica

Em Lopes et al. (2009a) há uma descrição detalhada da técnica de "shifting-gapper" para rejeição de intrusos; o procedimento é similar ao feito em Fada et al. (1996). Nesta técnica há aplicação da "técnica de gap" em bins radiais do centro do aglomerado. O tamanho do bin é de $0,42h^{-1}Mpc$ ou maior, forçando a seleção de pelo menos 15 galáxias. Galáxias não associadas ao corpo principal do aglomerado são excluídas, e o procedimento se repete até que o número de membros fique constante. É válido lembrar que este método não assume que o sistema esteja em equilíbrio dinâmico. O processo é composto de 3 partes principais:

- Seleccionamos todas as galáxias dentro de $2,5h^{-1}Mpc$ partindo do centro do aglomerado, tal que $|cz - cz_{aglomerado}| \leq 4000km/s$.
- Antes de começar o procedimento por si só, devemos ter um corte de velocidade máxima e estimar um limite de velocidade para que seja simétrico.
- Quando seleccionamos galáxias dentro de um raio de $0,42h^{-1}Mpc$ ou maior, no caso de que haja menos de 15 galáxias, se o raio entre duas galáxias é maior que $0,7h^{-1}Mpc$, o procedimento é parado. Assim, todas as galáxias que estão em um raio maior ou igual desta galáxias são eliminadas como intrusas.

5.2.2 A Aplicação

A análise do virial foi feita utilizando-se programas feitos por Lopes et al. (2009a,b). O primeiro programa estima o centro e limites de velocidades do aglomerado, e assim, fornece o arquivo de entrada para o segundo programa que calculará a massa do aglomerado. A figura 5.6 exhibe os espaços de fases obtidos com o procedimento de "shifting-gapper" (Lopes et al., 2009a).

Este método também foi utilizado em Lopes et al. (2009a,b) para calcular a massa de aglomerados. Nestes artigos os autores comparam essas massas com massas obtidas para os mesmos aglomerados utilizando-se outros métodos, como o método da cáustica (Rines & Diaferio, 2006). Eles também comparam a massa com diferentes observáveis

(no óptico e em raios-X), com o objetivo de verificar a eficiência destes como calibradores de massa. Vale ressaltar que o programa desenvolvido por Lopes et al. (2009a) está entre os melhores para recuperação de massas de simulações (Old et al., 2015).

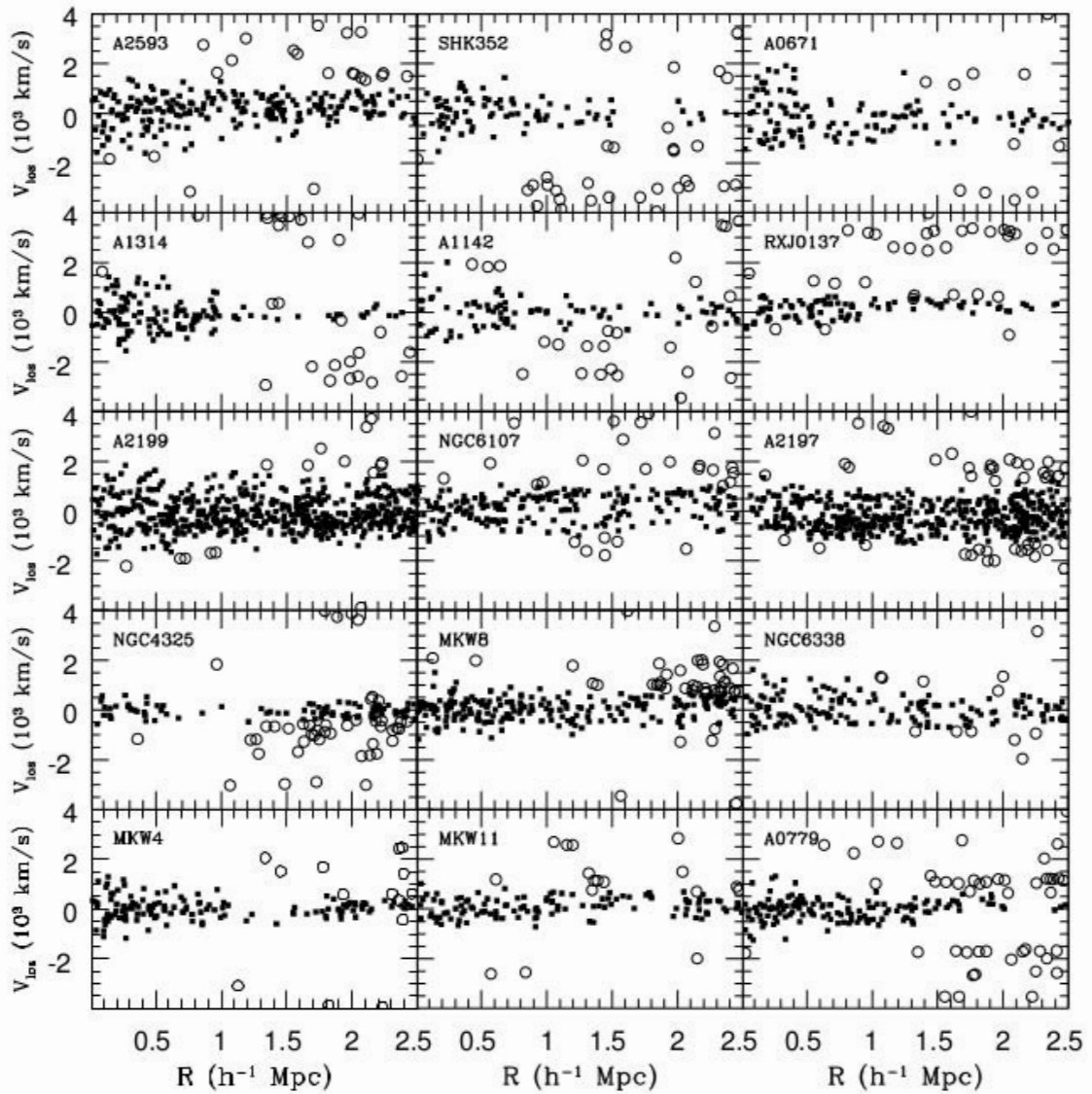


FIGURA 5.6: Diagramas de fase de 15 aglomerados da amostra NoSOCS como exemplos. A seleção de membros foi feita utilizando-se o procedimento de "shifting gap-per" (Lopes et al., 2009a). As velocidades e os raios são com respeito ao centro dos aglomerados. Os quadrados pretos são os membros e os círculos abertos são intrusos.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por este trabalho. Separamos os resultados em duas partes: os resultados para a amostra observada e para a amostra simulada. A seção que trata da amostra simulada está dividida em dois subitens, um para a amostra proveniente da Simulação Millennium e outro para a amostra proveniente da Simulação EAGLE.

6.1 Resultados Utilizando-se a Amostra Observada

Aplicando-se o método da cáustica e a análise do virial na amostra do SDSS obtivemos valores para as dispersões de velocidades, R_{200} e M_{200} .

A figura 6.1 compara os valores obtidos para os σ obtidos pelos dois métodos. A mediana da distribuição é exibida pela linha tracejada, e a linha preta indica o valor 1 para $\sigma_{vir}/\sigma_{caus}$, para melhor comparação visual - o mesmo vale para todos os gráficos posteriores das seções 6.1 e 6.2.1. Vemos que o valor obtido está muito próximo de 1, ou seja, ambos os métodos retornaram medianamente valores próximos para as dispersões de velocidades. É válido notar que quando σ_{vir} é menor, os valores de $\sigma_{vir}/\sigma_{caus}$ são menores, conforme σ_{vir} cresce, os valores de $\sigma_{vir}/\sigma_{caus}$ ficam maiores.

Os valores de R_{200} obtidos pela análise do virial foram cerca de duas vezes maiores que os obtidos pelo método da cáustica. Os valores de M_{200} obtidos pela análise do virial foram cerca de quatro vezes maiores que as massas obtidas pela cáustica. A figura 6.2 mostra os gráficos comparativos.

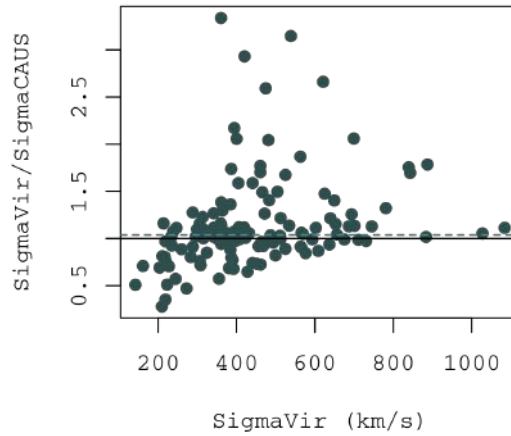


FIGURA 6.1: Comparação das dispersões de velocidades obtidas pelo método da cáustica e pela análise do virial para os dados do SDSS.

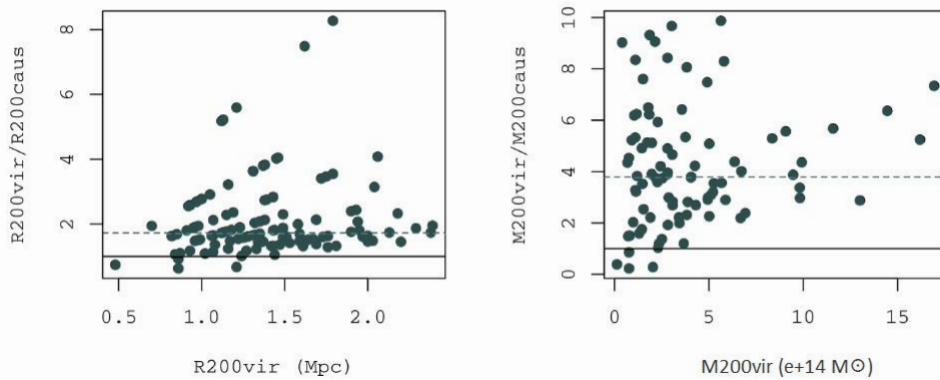


FIGURA 6.2: Comparando os R_{200} e M_{200} obtidos pelo método da cáustica e pela análise do virial.

6.2 Resultados Utilizando-se a Amostra Simulada

6.2.1 Simulação Millennium

Também para os dados simulados do Millennium, as razões das dispersões de velocidades obtidas com ambos os métodos tiveram uma mediana muito próxima de 1. Ou seja, as estimativas de ambos os métodos deram valores parecidos. Para baixos σ a dispersão dos dados é maior, observe a figura 6.3.

Diferentemente dos dados do SDDS, utilizando-se simulações, temos os valores reais do sistema - R_{200} e M_{200} . Assim, podemos comparar os valores obtidos por cada

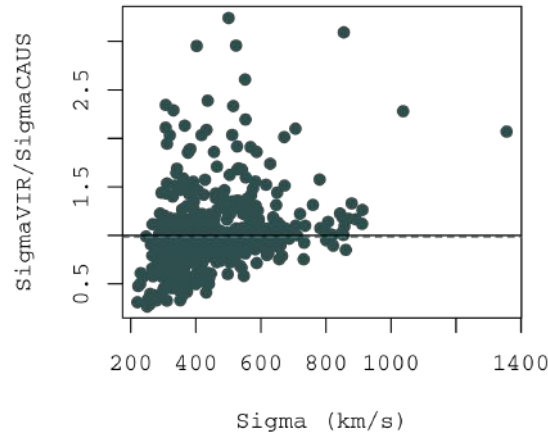


FIGURA 6.3: Comparação das dispersões de velocidades para a amostra do Millennium.

método com os valores da simulação, e analisar qual dos métodos melhor recuperou os valores tabelados pela simulação.

A figura 6.4 é composta por dois gráficos: um compara os R_{200} obtidos pela análise do virial com os valores da simulação, e o outro compara os R_{200} obtidos pelo método da cáustica com os valores da simulação. Os raios (R_{200}) obtidos com o método do virial deram medianamente um valor muito próximo ao da simulação. Podemos ver no gráfico da esquerda da figura 6.4 esta comparação. Observe que a simulação possui uma resolução característica que é exibida em forma de padrões nos gráficos. Os raios obtidos com o método da cáustica foram, em geral, superestimados em comparação ao valor da simulação. No gráfico da direita da figura 6.4 podemos ver a comparação. Observe que existem padrões característicos deste gráfico, em especial. Isto ocorre por três motivos: a simulação possui uma resolução, o perfil de massa da cáustica possui uma resolução, e estamos lidando com duas grandezas atreladas.

As massas (M_{200}) obtidas com o método do virial recuperam melhor as massas da simulação. Em baixas massas, a dispersão de M_{200}/M_{vir} é maior, observe o gráfico da esquerda da figura 6.5. Existem ainda evidentes padrões nos gráficos da figura 6.5, isso ocorre devido aos motivos anteriormente citados para a comparação de valores de R_{200} . De um modo geral, a estimativa da cáustica superestimou os valores das massas dos aglomerados.

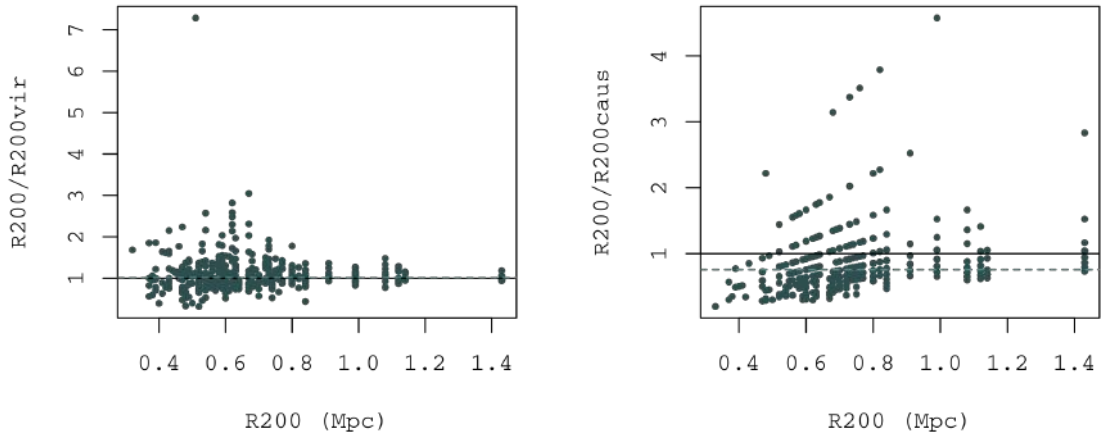


FIGURA 6.4: Comparação de R_{200} da Simulação Millennium com R_{200} obtidos pelo método da cáustica e análise do virial.

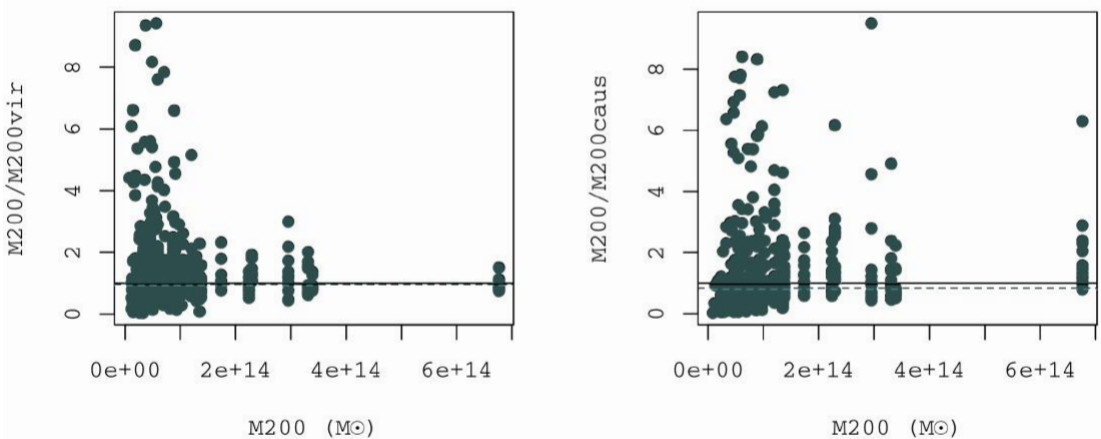


FIGURA 6.5: Comparação de M_{200} da Simulação Millennium com M_{200} obtidos pelo método da cáustica e análise do virial.

6.2.2 Simulação EAGLE

Aplicamos o método da cáustica para a amostra retirada da Simulação EAGLE utilizando diferentes redshifts. No entanto, o CausticApp não nos retornou um perfil de massa para boa parte da amostra - mais de 1/3 dos aglomerados não puderam ser analisados. Além disso, não houve concordância entre a massa da simulação e a massa obtida pelo método da cáustica. Acreditamos que isso esteja relacionado ao fato dos aglomerados serem pouco massivos.

6.3 Discussão

Estamos interessados em entender os processos físicos por detrás destes resultados. As superestimções e subestimções de raios e massas podem estar atreladas a vários processos físicos diferentes: presença de subestruturas, multimodalidade de sistemas, sistemas não virializados, ausência de esfericidade, e fricção dinâmica causada por galáxias vermelhas brilhantes. Além disso, podem haver efeitos de seleção que causem tal discrepância; como, por exemplo, durante a seleção dos membros do aglomerado.

Vimos que na amostra observada os valores obtidos, em geral, para a massa do virial é maior que a massa da cáustica. Isso significa que a massa da cáustica está sendo subestimada de alguma forma. A presença de subestruturas pode, de alguma forma, estar influenciando esta subestimção, além dos fatores citados anteriormente.

Outra razão para a discrepância no raio e na massa entre os métodos da cáustica e simulações (ou entre cáustica e virial na seção anterior) é devido ao perfil de massa no método da cáustica ser não-paramétrico. Na análise do virial assumimos um perfil de NFW (Navarro et al., 1996), que está em melhor acordo com as simulações. O perfil da cáustica concorda em $\approx 50\%$ dos casos (Lopes et al., 2009a). O programa desenvolvido por Lopes et al. (2009a) ficou entre os melhores para a recuperação de massa de aglomerados (Old et al., 2015), isso justifica o bom acordo com a Simulação Millennium.

Capítulo 7

Conclusões e Perspectivas Futuras

Obtivemos que a análise do virial recupera melhor os valores simulados de M_{200} , R_{200} e σ do que o método da cáustica, para a Simulação Millennium. Além disso obtivemos valores em desacordo - em até uma ordem de grandeza - para as massas, utilizando-se os dados do SDSS; de forma que o método da cáustica encontra valores de massas menores que a análise do virial. E isso se deve provavelmente às premissas feitas em cada um dos métodos que não foram atendidas - sistema esférico, sistema em equilíbrio dinâmico etc.

O próximo passo é aplicar a análise do virial para a amostra da simulação EAGLE, e comparar o resultado com o obtido para o método da cáustica. Nesta amostra temos aglomerados em diferentes redshifts, então é possível que possamos verificar a eficiência dos métodos em diferentes redshifts.

Também iremos analisar os objetos nos quais não pudemos aplicar o método da cáustica - por não conseguirmos rodar o CausticApp corretamente. Provavelmente estes objetos não possuem simetria esférica e possuem subestruturas consideráveis, e por isso, não pudemos aplicar o método da cáustica - como aconteceu com alguns aglomerados da amostra do Millennium, e com boa parte da amostra do EAGLE.

Ademais, iremos comparar as massas de aglomerados obtidas utilizando também os métodos de raios-X e de lentes gravitacionais através da literatura.

Referências Bibliográficas

- N. A. Bahcall & R. Cen. Galaxy clusters and cold dark matter - A low-density unbiased universe? *ApJ*, 398:L81–L84, October 1992. doi: 10.1086/186582.
- M. Bartelmann & M. Steinmetz. A Comparison of X-ray and Strong Lensing Properties of Simulated X-ray Clusters. *MNRAS*, 283:431–446, November 1996. doi: 10.1093/mnras/283.2.431.
- J. Binney & S. Tremaine. *Galactic dynamics*. 1987.
- A. Diaferio. Mass estimation in the outer regions of galaxy clusters. *MNRAS*, 309: 610–622, November 1999. doi: 10.1046/j.1365-8711.1999.02864.x.
- A. Diaferio & M. J. Geller. Infall Regions of Galaxy Clusters. *ApJ*, 481:633–643, May 1997. doi: 10.1086/304075.
- G. Djorgovski. Galaxy Clusters. http://www.astro.caltech.edu/~george/ay127/Ay127_GalClusters.pdf, 2017. Accessed: 2017-07-15.
- S. G. Djorgovski, R. R. Carvalho, R. R. Gal, S. C. Odewahn, A. A. Mahabal, R. Brunner, P. A. A. Lopes, & J. L. Kohl Moreira. The digital Palomar observatory sky survey (DPOSS): general description and the public data release. *Bulletin of the Astronomical Society of Brazil*, 23:197–197, August 2003.
- I. Dvorkin & Y. Rephaeli. Evolution of the gas mass fraction in galaxy clusters. *MNRAS*, 450:896–904, June 2015. doi: 10.1093/mnras/stv644.
- G. Fahlman, N. Kaiser, G. Squires, & D. Woods. Dark matter in MS 1224 from distortion of background galaxies. *ApJ*, 437:56–62, December 1994. doi: 10.1086/174974.

- M. Girardi, S. Borgani, G. Giuricin, F. Mardirossian, & M. Mezzetti. The Observational Mass Function of Nearby Galaxy Clusters. *ApJ*, 506:45–52, October 1998a. doi: 10.1086/306252.
- M. Girardi, G. Giuricin, F. Mardirossian, M. Mezzetti, & W. Boschin. Optical Mass Estimates of Galaxy Clusters. *ApJ*, 505:74–95, September 1998b. doi: 10.1086/306157.
- H. Hoekstra. The effect of distant large scale structure on weak lensing mass estimates. *A&A*, 370:743–753, May 2001. doi: 10.1051/0004-6361:20010293.
- H. Hoekstra. A comparison of weak-lensing masses and X-ray properties of galaxy clusters. *MNRAS*, 379:317–330, July 2007. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.11951.x.
- E. P. Hubble. Extragalactic nebulae. *ApJ*, 64, December 1926. doi: 10.1086/143018.
- Y. P. Jing & G. Borner. The velocity dispersion profiles of clusters of galaxies: a cosmological test and the sampling effect. *MNRAS*, 278:321, January 1996. doi: 10.1093/mnras/278.2.321.
- P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, R. R. Gal, S. G. Djorgovski, S. C. Odewahn, A. A. Mahabal, & R. J. Brunner. The Northern Sky Optical Cluster Survey. IV. An Intermediate-Redshift Galaxy Cluster Catalog and the Comparison of Two Detection Algorithms. *AJ*, 128:1017–1045, September 2004. doi: 10.1086/423038.
- P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, J. L. Kohl-Moreira, & C. Jones. NoSOCS in SDSS - I. Sample definition and comparison of mass estimates. *MNRAS*, 392:135–152, January 2009a. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13962.x.
- P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, J. L. Kohl-Moreira, & C. Jones. NoSOCS in SDSS - II. Mass calibration of low redshift galaxy clusters with optical and X-ray properties. *MNRAS*, 399:2201–2220, November 2009b. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15425.x.
- R. Mohayaee & R. B. Tully. The Cosmological Mean Density and Its Local Variations Probed by Peculiar Velocities. *ApJ*, 635:L113–L116, December 2005. doi: 10.1086/499774.
- J. F. Navarro, C. S. Frenk, & S. D. M. White. The Structure of Cold Dark Matter Halos. *ApJ*, 462:563, May 1996. doi: 10.1086/177173.

- L. Old, R. Wojtak, G. A. Mamon, R. A. Skibba, F. R. Pearce, D. Croton, S. Bamford, P. Behroozi, R. de Carvalho, J. C. Muñoz-Cuartas, D. Gifford, M. E. Gray, A. v. der Linden, M. R. Merrifield, S. I. Muldrew, V. Müller, R. J. Pearson, T. J. Ponman, E. Rozo, E. Rykoff, A. Saro, T. Sepp, C. Sifón, & E. Tempel. Galaxy Cluster Mass Reconstruction Project - II. Quantifying scatter and bias using contrasting mock catalogues. *MNRAS*, 449:1897–1920, May 2015. doi: 10.1093/mnras/stv421.
- P. J. E. Peebles, R. A. Daly, & R. Juszkiewicz. Masses of rich clusters of galaxies as a test of the biased cold dark matter theory. *ApJ*, 347:563–574, December 1989. doi: 10.1086/168149.
- K. Rines & A. Diaferio. CIRS: Cluster Infall Regions in the Sloan Digital Sky Survey. I. Infall Patterns and Mass Profiles. *AJ*, 132:1275–1297, September 2006. doi: 10.1086/506017.
- R. Sadat. Clusters of Galaxies and Mass Estimates. In D. Valls-Gabaud, M. A. Hendry, P. Molaro, & K. Chamcham, editors, *From Quantum Fluctuations to Cosmological Structures*, volume 126 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 349, September 1997.
- C. L. Sarazin. *X-ray emission from clusters of galaxies*. 1988.
- P. Schneider. *Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie*. 2006.
- P. Schneider, L. King, & T. Erben. Cluster mass profiles from weak lensing: constraints from shear and magnification information. *A&A*, 353:41–56, January 2000.
- A. L. Serra & A. Diaferio. Identification of Members in the Central and Outer Regions of Galaxy Clusters. *ApJ*, 768:116, May 2013. doi: 10.1088/0004-637X/768/2/116.
- A. L. Serra, A. Diaferio, G. Murante, & S. Borgani. Measuring the escape velocity and mass profiles of galaxy clusters beyond their virial radius. *MNRAS*, 412:800–816, April 2011. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17946.x.
- G. Soucail, B. Fort, Y. Mellier, & J. P. Picat. A blue ring-like structure, in the center of the A 370 cluster of galaxies. *A&A*, 172:L14–L16, January 1987.
- R. A. Sunyaev & Y. B. Zeldovich. Distortions of the Background Radiation Spectrum. *Nature*, 223:721–722, August 1969. doi: 10.1038/223721a0.

- M. van Haarlem & R. van de Weygaert. Velocity Fields and Alignments of Clusters in Gravitational Instability Scenarios. *ApJ*, 418:544, December 1993. doi: 10.1086/173416.
- G. M. Voit. Tracing cosmic evolution with clusters of galaxies. *Reviews of Modern Physics*, 77:207–258, April 2005. doi: 10.1103/RevModPhys.77.207.
- D. Walsh, R. F. Carswell, & R. J. Weymann. 0957 + 561 A, B - Twin quasistellar objects or gravitational lens. *Nature*, 279:381–384, May 1979. doi: 10.1038/279381a0.
- R. Weymann. The Energy Spectrum of Radiation in the Expanding Universe. *ApJ*, 145: 560, August 1966. doi: 10.1086/148795.
- F. Zwicky. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6:110–127, 1933.
- F. Zwicky. On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *ApJ*, 86:217, October 1937. doi: 10.1086/143864.
- F. Zwicky. The Coma Cluster of Galaxies. *PASP*, 63:61, April 1951. doi: 10.1086/126318.