

Universidade Federal do Rio Grande - FURG

Instituto de Matemática, Estatística e Física - IMEF

Grupo de Astrofísica Teórica e Computacional - GATC

Os efeitos do redshift na morfometria de galáxias

Leonardo de Albernaz Ferreira

Rio Grande-RS, 15 de Janeiro de 2015

Universidade Federal do Rio Grande - FURG
Instituto de Matemática, Estatística e Física - IMEF
Grupo de Astrofísica Teórica e Computacional - GATC

Os efeitos do redshift na morfometria de galáxias

Discente: Leonardo de Albernaz Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Ferrari

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Física
Bacharelado da Universidade Federal do Rio Grande como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel em Física.

Rio Grande – RS, 15 de Janeiro de 2015

Abstract

In order to study galaxy formation and evolution, one needs to understand how galaxy morphology evolves with time, measuring morphological features in several redshifts. But galaxy morphology in high redshifts can be easily biased by PSF, noise and cosmological effects. In order to understand these problems we report the behavior of several morphometric and structural parameters (eg. Sérsic Index, Gini Coefficient, Concentration, Asymmetry, Smoothness and M_{20}) for a sample of 100 nearby galaxies of the EFIGI catalog under FERENGI's artificial redshifting simulations, starting from 150 Mpc to 1500 Mpc in steps of 50 Mpc, resulting in 28 simulations per galaxy. All parameters are then measured from the FERENGI's 2800 output images with the MORFOMETRYKA package. We show that the majority of these parameters are high sensitive to the cited effects and need to be measure with great care.

Resumo

Um dos principais objetivos da morfologia de galáxias é entender como esses objetos se formam e evoluem. Uma das formas de abordar esse problema é medir características morfológicas em diversos redshifts, mas isso não é uma tarefa simples. A morfologia de galáxias em regimes de altos redshifts pode facilmente sofrer viés da PSF, ruído e de efeitos cosmológicos. A fim de entendermos como esses problemas afetam nossas medidas, reportamos o comportamento de diversos parâmetros morfométricos e estruturais (eg. Índice de Sérsic, Coeficiente de Gini, Concentrações, Assimetrias, Suavidade e M_{20}) para uma amostra de 100 galáxias locais do catálogo EFIGI sob as simulações de redshift artificial do FERENGI, indo de 150 Mpc até 1500 Mpc em passos de 50 Mpc, resultando em 28 simulações por galáxia. Todos os parâmetros são então medidos das 2800 imagens resultantes do FERENGI utilizando o MORFOMETRYKA. Nós mostramos que a maioria dos parâmetros utilizados são altamente sensíveis aos efeitos citados e devem ser medidos com bastante cautela.

Agradecimentos

- Agradeço primeiramente à minha família, especialmente aos meus pais por sempre serem meu apoio fundamental, me compreendendo mesmo na época em que eu fui o filho mais ausente do mundo. Sempre pensaram em mim em primeiro lugar, independente da minha retribuição.
- Ao meu orientador Fabricio Ferrari por ter me proporcionado muitas oportunidades únicas durante o curso, sempre me mantendo interessado no trabalho e sempre querendo que eu desenvolvesse minhas capacidades da forma mais eficiente possível. Sempre foi compreensível quando tive que me tornar ausente. Eu provavelmente não teria me encontrado na física tão rápido se não fosse por ele.
- Ao Felipe Telles por ser meu amigo e companheiro desde o primeiro dia da graduação. Ao Vinícius Becker, Felipe Vargas e ao Ted Leandro por me proporcionarem divertidas discussões sobre os mais variados assuntos. À Graciana Brum por ser minha amiga pessoal e colega de Astrofísica e a todos meus colegas de graduação, que junto comigo formaram uma das maiores turmas de física da FURG. Vocês fizeram a minha ser muito mais agradável.
- Ao Matheus Nunes e ao Rodrigo Arvoredó por serem a família que eu escolhi, independente da distância.
- Ao Celso Dias, Thiago Barros e Edmilson Rocha por serem meus amigos diários, sendo eles a principal válvula de escape do meu estresse e por compartilharem a maioria dos meus hobbies.
- À Jéssica Demarchi por ter deixado minha mente afiada, meu emocional regulado e de ter me proporcionado os melhores finais de semana de 2014.

Sumário

Abstract	ii
Resumo	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	v
Lista de Figuras	vii
1 Introdução	1
2 Breve história da Cosmologia	3
2.1 Cosmologia Antiga	4
2.1.1 Babilônia	4
2.1.2 Modelo Aristotélico	5
2.1.3 Modelo Epicuriano	7
2.1.4 Modelo Estoico	8
2.2 Cosmologia Medieval	9
2.2.1 Imperio Islâmico	10
2.2.2 Alta e Baixa Idade Média	10
2.2.3 Revolução Copernicana e os modelos heliocêntricos	11
2.3 Idade Moderna	15
2.3.1 Modelo Newtoniano	16
2.4 Cosmologia Moderna	17
2.4.1 Paradoxo de Olbers	17
2.4.2 Princípio Cosmológico	18
2.4.3 Einstein e Fridmann	20
2.4.4 Big Bang e a expansão do universo	22
2.4.4.1 Vesto Slipher	22
2.4.4.2 Lemaître	24
2.4.4.3 Leavitt e as estrelas cefeidas	26
2.4.4.4 Edwin Hubble	27
2.4.5 Radiação cósmica de fundo	29

2.4.6	Matéria Escura	31
2.4.7	Energia Escura	33
2.5	Modelo cosmológico padrão	34
3	Morfologia de galáxias e as medidas morfométricas	39
3.1	A sequência de Hubble	40
3.2	Parâmetros morfométricos	43
3.2.1	Perfis de Brilho	43
3.2.2	Sistema CASGM	44
3.2.2.1	Concentrações	44
3.2.2.2	Assimetrias	44
3.2.2.3	Suavidade	45
3.2.2.4	Coefficiente de Gini	46
3.2.2.5	M_{20}	48
3.3	Efeitos adversos na morfometria	48
3.3.1	Escurecimento Cosmológico	49
3.3.2	Efeitos instrumentais	50
3.3.2.1	PSF e Convolução	50
3.3.2.2	Ruído	51
3.3.3	FERENGI e o redshift artificial de galáxias	52
3.3.4	MORFOMETRYKA	53
4	Resultados	55
4.1	Catálogo EFIGI	55
4.2	Amostra	56
4.2.1	Características da amostra	58
4.3	O Processo	61
4.4	O comportamento dos parâmetros morfométricos com o redshift	64
4.4.1	Assimetrias	64
4.4.2	Concentrações	66
4.4.3	Coefficiente de Gini	67
4.4.4	Índice de Sérsic	68
4.4.5	Suavidades	69
4.4.6	M_{20}	70
5	Conclusão	72
	Bibliografia	74

Lista de Figuras

2.1	Possível mapa estelar primitivo	5
2.2	Representação do modelo Aristotélico	6
2.3	Diagrama do movimento retrogrado aparente dos planetas	7
2.4	Representação do modelo Epicuriano	7
2.5	Representação do modelo estoico	9
2.6	Representação artística do empíreo	10
2.7	Representação do modelo heliocêntrico	12
2.8	Estatua em homenagem à Tycho Brahe e Johannes Kepler	13
2.9	Paralaxe em medidas astronômicas	14
2.10	Diagrama da segunda lei de Kepler	15
2.11	O céu claro do paradoxo de Ólbers	18
2.12	Homogeneidade no universo	19
2.13	Distribuição de galáxias do SDSS	20
2.14	Velocidade de galáxias do trabalho original de Slipher (1915)	22
2.15	Orientação de galáxias espirais	23
2.16	Velocidades de galáxias do trabalho original de Slipher (1917)	23
2.17	Diagrama da expansão do universo a partir de uma singularidade	25
2.18	Representação da relação magnitude versus período das cefeidas	26
2.19	Lei de Hubble	28
2.20	Antena Holmdel Horn que captou a radiação cósmica de fundo	29
2.21	Ajuste de corpo negro para a radiação cósmica de fundo	30
2.22	Pequenas perturbações na radiação cósmica de fundo	31
2.23	Curva de rotação para a galáxia Andrômeda	32
2.24	Comparação da distribuição de galáxias para modelos dominados por ma- téria escura	32
2.25	Descoberta da expansão acelerada	34
3.1	Elipticidade e a nomenclatura da sequência de Hubble	40
3.2	Sequência de Hubble por Hubble (1936)	41
3.3	Comparação entre galáxia local e galáxias em altos redshifts	42
3.4	Coeficiente de Gini	47
3.5	Efeito da PSF em um objeto de exemplo	51
3.6	Exemplo do efeito do ruído em um campo de galáxias simuladas	52
3.7	Simulações do EFIGI de Barden et al. (2008)	53
3.8	Exemplo de resultado do MORFOMETRYKA	54

4.1	Distribuição morfológica e de redshifts do catalogo EFIGI Baillard et al. (2011)	56
4.2	Mosaico das 100 galáxias da amostra utilizada	58
4.3	Distribuição morfológica da amostra	59
4.4	Distribuição de redshifts da amostra	60
4.5	Distribuição do índice de Sérsic da amostra	60
4.6	Distribuição dos raios efetivos da amostra	61
4.7	Processo desenvolvido para analisar o comportamento dos parâmetros morfolômétricos com o redshift	62
4.8	Mosaico com as 28 simulações efetuadas para a galáxia PGC 3620	63
4.9	Comportamento do índice A_1 e A_3 com o redshift	65
4.10	Imagens mostrando a evolução das assimetrias	66
4.11	Comportamento dos índices de concentração com o redshift	67
4.12	Comportamento do coeficiente de Gini com o redshift	68
4.13	Comportamento do índice de Sérsic com o redshift	69
4.14	Comportamento do índice S_1 e S_3 com o redshift	70
4.15	Comportamento do índice M_{20} com o redshift	71

Para Jéssica

I couldn't get you to the ocean, but there was nothing stopping me bringing the ocean to you.

- Neil Gaiman

Capítulo 1

Introdução

There are naive questions, tedious questions, ill-phrased questions, questions put after inadequate self-criticism. But every question is a cry to understand the world. There is no such thing as a dumb question.

Carl Sagan

A morfologia de galáxias é uma área relativamente jovem da Astrofísica que tem como um de seus objetivos entender como essas estruturas se formam e evoluem. Uma das formas de fazer isso é entender como a morfologia dessas galáxias evolui com o redshift. Mas ao medirmos distâncias em escala cosmológica, é obrigatório invocar um modelo cosmológico, já que o universo expande de forma não linear. Felizmente, nas últimas décadas se estabeleceu o que conhecemos hoje como **modelo cosmológico padrão**, o que facilita nosso trabalho ao entender quais os processos que dominam a dinâmica do universo e como medimos distâncias nele. Temos disponíveis também grandes levantamentos do céu que nos proporcionam uma imensidão de dados de galáxias em diversos redshifts para serem analisados. Mas temos que ter cuidado: as medidas morfométricas feitas em galáxias locais não podem ser feitas em distâncias maiores sem um cuidado adequado. Existem diversos efeitos não só instrumentais, mas também cosmológicos, que podem afetar como essas galáxias são detectadas e como a morfologia delas é apresentada. Ao efetuar medidas morfométricas nesses regimes, é útil conhecer como esses parâmetros se comportam devido a puramente efeitos cosmológicos e instrumentais. Para fazer isso,

é possível utilizar galáxias locais com uma morfologia bem descrita e simular os efeitos da instrumentação e do modelo cosmológico nesses objetos, assim, qualquer variação da morfologia original será resultado desses efeitos. O objetivo desse trabalho é adquirir esse conhecimento e desenvolver um processo que seja automático a fim de ser replicado para outras amostras. Aqui nos limitamos a fazer as simulações para uma subamostra do catálogo EFIGI contando com 100 galáxias de variadas morfologias. Como é necessário invocar o modelo cosmológico para efetuar o processo, apresentamos no capítulo 2 uma contextualização histórica sobre o desenvolvimento do modelo Λ CDM, com as principais descobertas e trabalhos que culminaram na sua criação, finalizando com uma seção sobre como as distâncias cosmológicas podem ser medidas através do redshift. Já no capítulo 3, uma descrição básica da morfologia de galáxias é apresentada junto com a descrição dos parâmetros morfométricos utilizados no processo, finalizando com uma breve descrição dos principais efeitos adversos que podemos encontrar nas medidas, tanto cosmológicos como instrumentais. No capítulo 4, os resultados do trabalho são apresentados, mostrando o comportamento dos parâmetros citados para um intervalo de distância de 150 Mpc até 1500 Mpc, em que $1 \text{ Mpc} \approx 3.08 \times 10^{22} \text{ m}$

Capítulo 2

Breve história da Cosmologia

When we stand back from the study of a specialized area of knowledge, or just step aside from our everyday affairs, and reflect on things in general, and try to see the forest and not just the trees, the whole painting and not just the dabs of paint, the whole tapestry and not just the threads, we become cosmologists.

Edward Harrison

A cosmologia é a ciência que aborda o universo como um todo, indo do muito pequeno até o muito grande, de escalas de tempo infinitesimais até imensamente grandes, compreendendo todas as escalas de tamanho. A cosmologia moderna junta todo o conhecimento que temos sobre os fenômenos naturais e tenta desenvolver o modelo que melhor descreve o universo baseado em nossas observações. Mas isso nem sempre foi assim: a história da cosmologia é cheia de misticismo e em seus primórdios era mais um fenômeno cultural do que uma busca científica. A maioria das civilizações antigas percebiam o mundo ao redor e possuíam uma necessidade de adequar aquele mundo estranho às suas práticas culturais e sociais. O mundo era – e ainda é – um local estranho; qualquer explicação podia amenizar os aspectos selvagens, dando um sentido e proposta, não só para o próprio universo, mas para as pessoas que viviam nele. Os mais variados estudiosos dedicaram suas vidas para entender as principais questões que ainda nos permeiam, construindo aos poucos uma visão cada vez mais detalhada – mas não menos misteriosa – do Cosmos.

Desde os mitos da criação até os modelos de expansão acelerada de universo, passamos por religiosos, filósofos, cientistas e matemáticos das mais variadas eras, desde a Babilônia até aos grandes levantamentos de dados atuais, do olho nu aos mais avançados equipamentos ópticos disponíveis hoje, juntando toda a bagagem científica acumulada durante a história da nossa civilização. A cosmologia nos dá um contexto e molda como nós enxergamos o mundo. As antigas descrições cosmológicas, apesar de parecerem rústicas aos nossos olhos, são resultado do contexto onde as pessoas estavam inseridas. Se as analisarmos, iremos perceber que várias ideias sobre o universo nasceram, caíram em desuso e depois voltaram com uma nova roupagem, seguindo princípios muito semelhantes aos antigos. Por isso, iremos traçar uma linha histórica pelos modelos utilizados para descrever o universo e os principais eventos que culminaram em suas criações. Passaremos pelo modelos de universo Aristotélico, Epicuriano e estoico. Veremos que desde a criação de tais modelos, sua adoção foi alternando ao passo que novas ideias e necessidades eram introduzidas em cada época. Após o modelo Newtoniano (que é muito parecido com o Epicuriano), iremos direto para a cosmologia moderna, usando a Relatividade Geral como gancho entre os modelos antigos e nossa atual visão do Universo.

2.1 Cosmologia Antiga

Independente de localização geográfica e desenvolvimento cultural, todas civilizações que passaram pelo planeta desenvolveram mitos e histórias relacionadas com o universo, fazendo disso parte de suas práticas culturais e religiosas. Como suas interpretações dependem de uma boa descrição contextual da época, e tal debate histórico não é escopo do presente trabalho, iremos usar os modelos antigos mais conhecidos para descrever as principais ideias e pensamentos da cosmologia antiga partindo do início da descrição celeste, com os primeiros traços concretos sendo traçados até a Babilônia.

2.1.1 Babilônia

Baseados nos desenvolvimentos dos sumérios e da região da mesopotâmia em geral, os babilônicos foram os primeiros a obter sucesso ao descrever os fenômenos celestes matematicamente, entendendo a periodicidade dos mesmos, prevendo, por exemplo, as estações e eclipses. Apesar de serem muito bons com aritmética, todos os seus avanços eram motivados por buscas religiosas, falhando ao atribuir a natureza dos movimento dos corpos

celestes à divindade. As constelações do Zodíaco são historicamente traçadas até esta época.



FIGURA 2.1: Artefato histórico assírio representando um possível mapa estelar primitivo encontrado na biblioteca do rei Ashurbanipal (668-627 a.C) em Nineveh. Fonte: Kuyunjik Collection, British Museum. Disponível em <<http://www.staff.science.uu.nl/~gent0113/babylon/babybibl.htm>>. Acesso jan. 2015.

2.1.2 Modelo Aristotélico

Baseado nos trabalhos de Pitágoras e dos estudantes da escola de Platão, Aristóteles foi adepto do modelo de muitas esferas de Eudoxus, mas deu ao modelo um sentido físico. Havia várias esferas transparentes que giravam em torno da Terra, uma para cada planeta e outras para outras estrelas (Fig 2.5). Para Aristóteles, todo movimento necessitava de aplicação de força, com os corpos se movendo por causa da força de contato entre eles. Por isso, neste modelo o vácuo não poderia existir, pois com o vácuo, os corpos não estariam em contato e portanto, não se moveriam. Essa ideia se estendia para a ideia atômica da época: se a matéria fosse realmente feita de átomos, o espaço vazio entre eles proibiria o movimento, e tudo no universo seria inerte, portanto, átomos não poderiam existir. Todo o universo estaria contido em uma esfera de tamanho finito, pois um objeto infinito percorreria uma distância infinita em um tempo finito, o que é um absurdo.

As esferas uniram esta restrição com os pensamentos geométricos de que círculos eram perfeitos. Tudo se encontrava em um estado eternamente estacionário, não necessitando de um início, um problema que na época evocava uma entidade sobrenatural.



FIGURA 2.2: Representação artística do modelo de universo aristotélico por Leonard Digges. Cada círculo correspondia a uma esfera centrada na Terra. Fonte: Folger Shakespeare Library. Disponível em <<http://www.folger.edu/imgdtl.cfm?imageid=1580>>. Acesso em jan. 2015.

O modelo de universo de Aristóteles não explicava os movimentos aparentemente retrógrados dos planetas (Figura 2.3) e nem o por que deles serem aparentemente mais brilhantes em tal período. Uma proposta posterior feita a fim de utilizar epicírculos para modelar os movimentos retrógrados foi feita e depois aprimorada por Ptolomeu, ao utilizar também errantes e equantes. O modelo reproduzia bem os movimentos celestes observados e acabou perdurando por 14 séculos, até um pouco antes da revolução Copernicana. Apesar de ser preciso ao descrever os movimentos, o modelo aristotélico falhou ao incorporar outras ideias criadas pelos gregos, como a linha atomista, a sugestão de que a Via Láctea era constituída de um aglomerado de estrelas, de que a Terra tinha rotação e que também transladava em torno do Sol.

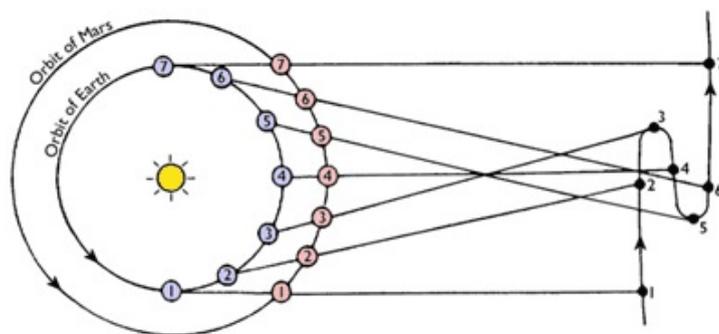


FIGURA 2.3: Diagrama mostrando o movimento retrógrado aparente de Marte com relação a Terra. Perceba que durante o período deste movimento (4), os planetas estão na menor distância possível, fazendo o brilho aparente de Marte aumentar. Fonte: Saint Mary's University. Disponível em <http://ap.smu.ca/demos/index.php?option=com_content&view=article&id=156&Itemid=94>. Acesso jan. 2015.

2.1.3 Modelo Epicuriano

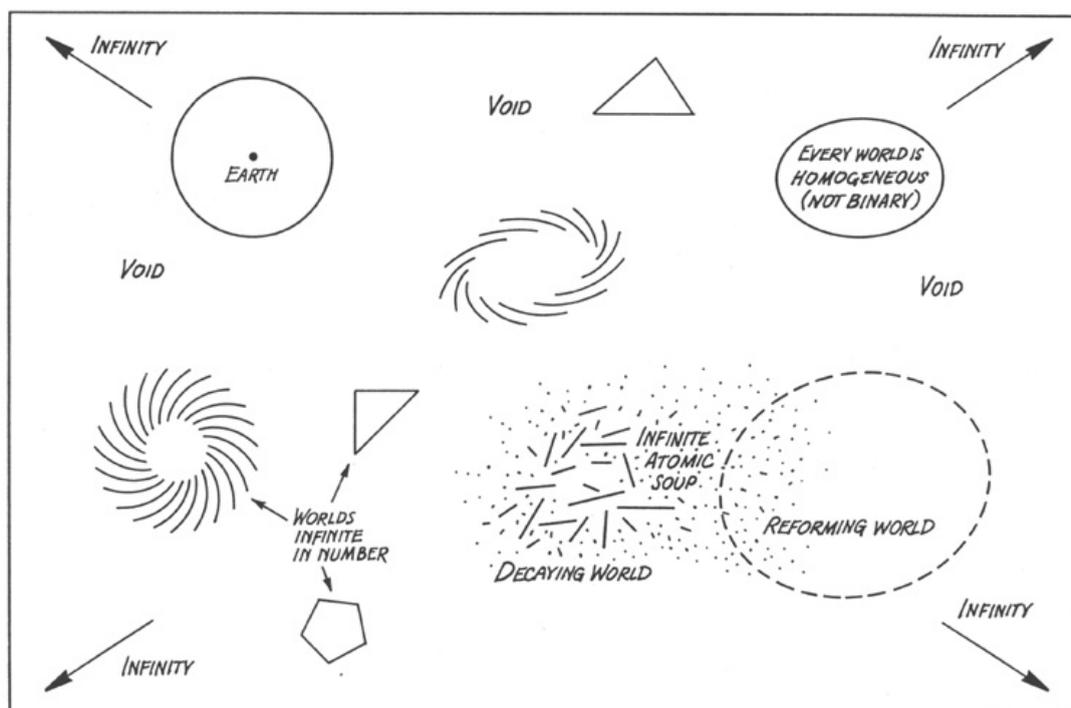


FIGURA 2.4: Representação do universo Epicuriano. A figure mostra os diversos aspectos desse modelo, como infinitos mundos (planetas), o espaço infinito e os eventos de um mundo se decompondo e se recombinando. Esse panorama é bastante semelhante à nossa atual visão de universo. Fonte: Dartmouth College. Disponível em <https://math.dartmouth.edu/archive/c2w99/public_html/album02.html>. Acesso em jan. 2015.

Em contrapartida com o modelo Aristotélico, havia o modelo Epicuriano, baseado nas ideias atomistas da época. Apesar de ser também eterno, o universo era agora infinito, constituído por infinitas "sementes" (mais tarde viriam a ser os átomos) de matéria, distribuídas ao longo do espaço vazio. Elas se moviam livre pelo vácuo, colidindo e se agregando, formando então outras estruturas, como os planetas, que então eram dissolvidas lentamente, voltando ao estado de átomos. Os átomos da linha atomista criada por Leucipo de Mileto e desenvolvida por Democritus eram constituídos da mesma substância, mas possuíam diferentes formas e tamanhos. Epicuro de Samos fundou a escola Epicuriana de filosofia, adotando as ideias atomistas, dando uma roupagem mais naturalista para o modelo cosmológico desordenado e de muitos mundos. Mesmo com ideias sofisticadas para a época, com várias analogias ao modelo da cosmologia moderna, ele conseguiu perdurar por 600 anos, até seu princípio natural ser rejeitado pelo crescimento das religiões que favoreciam os modelos aristotélicos e estoicos, que por sua vez também não eram compatíveis com as ideias atomistas. Se não fosse pela escola de Epicuro, as ideias de Leucipo e Demócrito teriam morrido.

2.1.4 Modelo Estoico

A escola estoicista, fundada por Zenão de Cítio, tinha como base princípios morais e sociais, apelando para uma visão mais mística do cosmos. A escola não era elitista e abrangia todas as classes sociais, e isso fez dela mais popular do que a Epicuriana no século 1 a.C. Para eles, tudo tinha um destino determinado e uma mente universal governava o mundo através do espírito divino. Eles acreditavam assim como a linha aristotélica que o universo era finito, mas além do cosmos existia um vazio misterioso. Este modelo, governado por suas ideias compatíveis com a religiosidade que se ergueu durante várias eras da história, principalmente na Idade Média, perdurou até o século XVI.

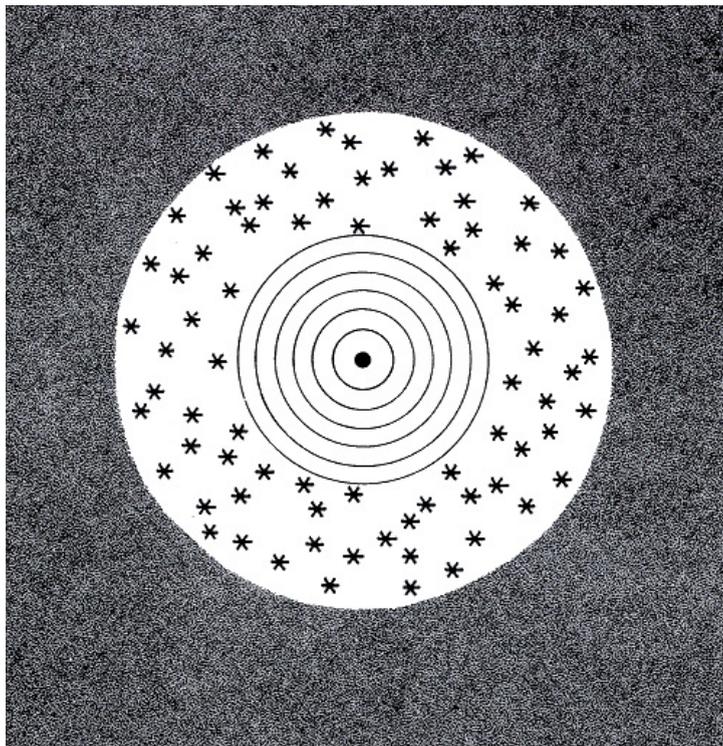


FIGURA 2.5: Representação do modelo de universo estoico, a base do modelo aristotélico era envolto por um vazio infinito e misterioso. Adaptado de [Harrison](#).

2.2 Cosmologia Medieval

Depois de uma época de florescimento científico e cultural, houve um período de escuridão intelectual, com poucos registros históricos, marcado pela queda do Império Romano Ocidental em 476 d.C, invadido pelos bárbaros germânicos. Conhecida hoje como a **Idade das Trevas**, o início da Idade Média marcou o retrocesso em ideias cosmológicas, transformando a Terra na divisória entre o paraíso e o inferno. O desenvolvimento científico não morreu por completo, mas a densidade de desenvolvimentos na área era bastante contrastante com a intensidade de pensamento filosófico produzido pelas escolas gregas. Após este período negro, o Império Islâmico trouxe uma nova chama de pensamento para o velho mundo, acordando a Europa novamente. Mesmo com as invasões mongólicas e turcas destruindo a cultura islâmica e chinesa, o panorama global nunca voltou à idade das trevas, mas agora o conhecimento era principalmente controlado pelas instituições religiosas da época.

2.2.1 Imperio Islâmico

Durante o século VII, o Império Islâmico se ergueu no Oriente Médio, trazendo com ele uma nova faísca no desenvolvimento cultural. Se estendeu das margens europeias e africanas até a Índia, reascendendo o desenvolvimento intelectual. Vários estudiosos e escribas foram para os grandes centros da nova civilização e começaram a traduzir manuscritos do mundo antigo, revivendo antigos conhecimentos. As ideias ressurgiram e se espalharam por todo mundo conhecido da época. No século IX, a Terra voltou a ser descrita como uma esfera, trazendo de volta os modelos geocêntricos antigos.

2.2.2 Alta e Baixa Idade Média

Com o conhecimento agora nas mãos de grandes instituições religiosas, como a Igreja Católica, as antigas ideias começavam a incorporar características divinas, em contrapartida das explicações naturalistas do modelo Aristotélico e Epicuriano. No século XI, o arcebispo de Canterbury, Anselm, introduziu a ideia de *Empíreo*, uma esfera de fogo (Fig 2.6) divino que se estendia após a esfera das estrelas, onde Deus estaria presente.



FIGURA 2.6: Representação artística do *CANTO XXXI* em [Dante, A. \(2004\)](#) onde Dante contempla o paraíso constituído pelo Empíreo

Nesta época, vários tradutores e escribas começaram a trazer os manuscritos do árabe e grego para o latim, facilitando a disseminação do desenvolvimento intelectual, culminando na criação das universidades. No início do século XIII, Thomas de Aquino mostrou que a doutrina cristã era compatível com o modelo Aristotélico, salvo pequenas alterações. Mesmo com a adoção do modelo, alguns dos interesses da Igreja não eram compatíveis, principalmente o fato de que na visão naturalista de Aristóteles, Deus não poderia mover a Terra, o que era extremamente inadequado à fé em uma divindade onipotente. Em 1277, Etienne Tempier, o arcebispo de Paris, proibiu o ensinamento de 219 ideias teológicas e filosóficas, e entre elas estavam as ideias naturalistas compatíveis com o modelo aristotélico e Epicuriano. As condenações definiram e forçavam a linha religiosa de que Deus era uma figura onipotente e onisciente. Sua influência não poderia ter limites, indo diretamente de encontro com a ideia aristotélica de universo finito, o qual não poderia acomodar tal divindade. As 219 condenações são um marco na cosmologia, pois marcam o fim da utilização do modelo aristotélico que foi utilizado por mais de 14 séculos, mudando profundamente como as pessoas da época pensavam sobre o mundo. Mais tarde, Thomas Bradwardine, que tinha se tornado arcebispo de Canterbury, expandiu a ideia de Empíreo criada por Anselm, acomodando a figura divina, transformando o Empíreo em um vazio infinito, o local onde Deus se encontrava dentro da figura cósmica aceita da época, transformando o universo Aristotélico em um universo estoico.

2.2.3 Revolução Copernicana e os modelos heliocêntricos

Apesar da mudança de paradigma com relação aos modelos cosmológicos ter se dado só no início do século XVI, várias propostas de modelos heliocêntricos já tinham sido feitas, uma inclusive por um grego, Aristarco de Samos. Mesmo com muitos trabalhos relacionados com os céus, a proposta de Aristarco só é citada por Arquimedes em *Arenarius*, mostrando que ela era muito pouco difundida na época. Foi com Nicolau Copérnico que o modelo teve uma nova chance. Estudioso do modelo Aristotélico aprimorado por Ptolomeu, Copérnico acreditava nos princípios Platônicos da perfeição do movimento circular. Mesmo Aristóteles e Ptolomeu seguindo a escola de Platão, os modelos aprimorados por eles deixaram um pouco de lado esta ideia quando as errantes e equantes foram adicionadas para explicar o movimento retrógrado aparente de alguns planetas. Ele conhecia também a proposta de Aristarco, e adaptar o modelo geocêntrico Aristotélico para um modelo heliocêntrico retirava a dependência nas equantes para explicar os movimentos aparentes, trazendo mais uma vez a ideia de movimento circular perfeito. Agora, o movimento retrógrado se dava pelas distâncias relativas dos planetas com relação à órbita em

torno do sol (Fig 2.7), como mostrado na Fig 2.3. Toda sua vida foi dedicada à calcular as órbitas heliocêntricas, e seu maior trabalho, *Revolutions of Celestial Spheres*, foi só publicado posteriormente à sua morte.

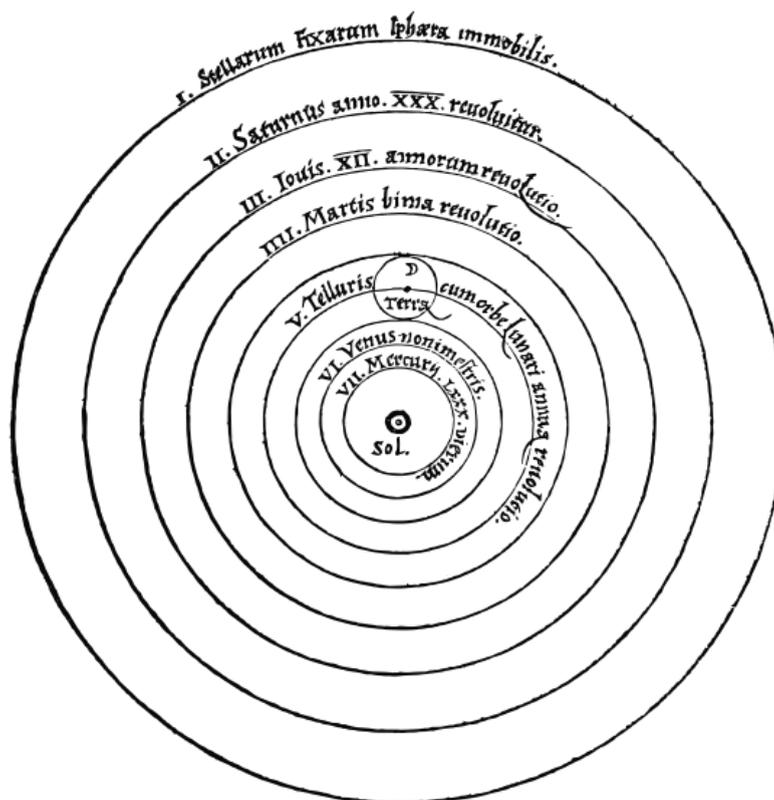


FIGURA 2.7: Representação do modelo heliocêntrico de Copérnico. Diagrama concebido pelo próprio Copérnico em ?.

Mesmo tentando trazer de volta para a mesa as ideias Platônicas, Copérnico se viu tendo que construir cada vez uma estrutura mais complexa, necessitando de cada vez mais órbitas para explicar todas as observações. A complexidade do modelo por ele adaptado era maior que a complexidade dos ajustes de Ptolomeu no modelo Aristotélico, tendo dificuldade para atingir o mesmo nível de precisão nas observações. Mais tarde, Thomas Digges estendeu a ideia da última esfera celeste das estrelas fixas para todo o infinito. Para Digges, o universo era infinito e deveria ser permeado com inúmeras estrelas, juntando um pouco as ideias Aristotélicas e Epicurianas juntamente com o modelo heliocêntrico de Copérnico. Agora com um modelo de universo infinito, Giordano Bruno espalhou a ideia de que o universo não era só infinito, mas não tinha ponto central. Esta era uma forte mudança de paradigma se pensarmos que o modelo comum da época era geocêntrico. Bruno usou esta linha de pensamento para adotar um modelo Epicuriano adaptado com

ideias religiosas, onde existiam incontáveis Terras habitadas, correspondendo à imensidão e excelência do Deus católico. Apesar dos aspectos religiosos, ele foi condenado e preso, passando os últimos 7 anos de sua vida sendo torturado. Recusando-se a fazer uma retratação, foi queimado na fogueira em 1600.



FIGURA 2.8: Estátua em homenagem à Tycho Brahe e Johannes Kepler em Praga.
Fonte: Wikipédia. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Tycho_Brahe>.
Acesso jan. 2015.

Outros passos importantes em direção ao modelo heliocêntrico foram dados por Tycho Brahe. Ele tentou provar o modelo Copernicano através de paralaxes. Se a Terra girava em torno do Sol durante o ano, então ela estaria em diferentes posições no espaço em diferentes períodos, fazendo com que as paralaxes pudessem ser observadas. Mas mesmo com os equipamentos mais modernos para época (antes da invenção do telescópio), Brahe não conseguiu observar tal efeito. Para ele, as estrelas não poderiam estar tão longes que não produzissem paralaxe. Sabendo que as estrelas deveriam ter um tamanho físico (não só um ponto no céu), precisariam ser muito maiores que o Sol, pois estariam muito longe e ainda eram visíveis. Esta ideia não era atraente na época.

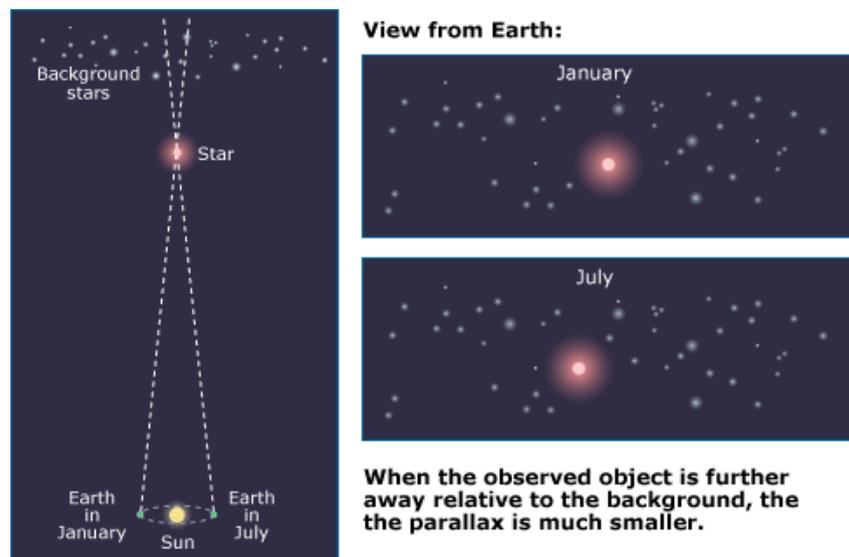


FIGURA 2.9: Diagrama exemplificando o efeito de paralaxe em medidas astronômicas. Na imagem da esquerda, a Terra aparece em duas posições, uma em Janeiro e outra em Julho (da esquerda pra direita, respectivamente). Nas imagens da direita é mostrado a diferença na posição da estrela sendo observada. Fonte: University of California Museum of Paleontology. Disponível em <<http://undsci.berkeley.edu/article/bundle>>. Acesso jan. 2015.

Mesmo rejeitando o modelo de Copérnico, Brahe criou o seu próprio modelo, onde o Sol orbitava a Terra e os planetas orbitavam o Sol. Ele tinha um assistente, Johannes Kepler, que depois herdou seu posto como professor de Matemática no Império Sagrado Romano, herdando também todos os registros das observações meticulosamente documentadas por Tycho. Ao contrário de seu antecessor, Kepler adotou o modelo Copernicano, e utilizando os dados de Tycho, passou anos tentando explicar os movimentos dos corpos celestes, particularmente os de Marte. No fim, Kepler conseguiu criar boas explicações com suas 3 leis do movimento planetário elíptico, mais conhecidas como **Leis de Kepler**. São elas

- **Lei das Órbitas:** A órbita de todos os planetas é elíptica, revolvendo em torno do Sol, onde este se encontra em um dos focos da elipse.
- **Lei das Áreas:** A linha que conecta o Sol e o planeta varre a mesma área no mesmo intervalo de tempo (Fig 2.10).
- **Lei dos Períodos:** O quadrado do período da órbita de qualquer planeta é proporcional ao cubo do semieixo maior da elipse. Tal que

$$\frac{T^2}{a^3} = const \quad (2.1)$$

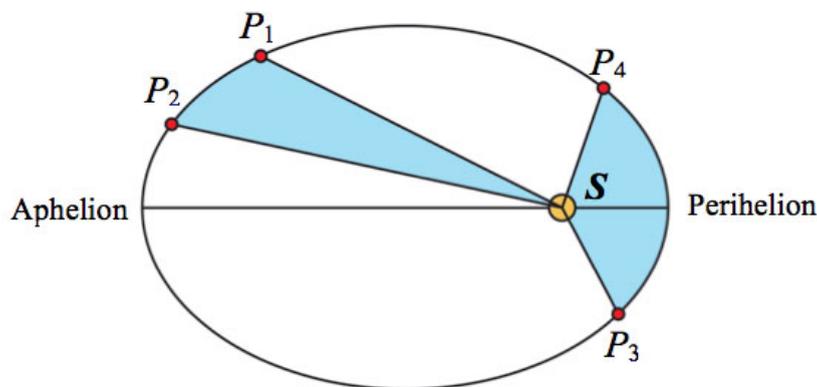


FIGURA 2.10: Representação da Segunda Lei de Kepler. Assumindo que o planeta varre as áreas formadas por P1-P2 e P3-P4 no mesmo tempo, as áreas serão idênticas. Fonte: Stanford Encyclopedia of Philosophy. Disponível em <<http://plato.stanford.edu/entries/kepler/>>. Acesso jan. 2015.

Tais leis são de extrema importância para a cosmologia e para toda a ciência. A Lei dos Períodos foi uma das bases para Isaac Newton criar a Teoria da Gravitação Universal. A revolução Copernicana teve sua conclusão com Galileu Galilei, que criou o telescópio, fazendo com ele diversas observações essenciais para astronomia, fortalecendo as ideias propostas por Copérnico e enfraquecendo o modelo geocêntrico. Através do aumento de suas lentes, a Terra parecia rotacionar em seu próprio eixo, fazendo também o movimento de translação ao redor do Sol. Ao olhar para as estrelas distantes com uma lente de quase 30x de aumento, percebeu que mesmo assim elas não apresentavam tamanho aparente, favorecendo a hipótese contrária à Tycho Brahe de que as estrelas estavam tão longe que não produziam paralaxe. Apesar dos fatos observacionais, Galileu foi perseguido por religiosos que apoiavam o modelo geocêntrico estoico da época, sendo ameaçado de tortura. No fim de sua vida, se retratou e abandonou o sistema heliocêntrico.

2.3 Idade Moderna

Com a transição da Idade Média para a Idade Moderna por volta do século XV e XVI, a cosmologia já estava tomando uma nova face. Agora, haviam dispositivos que facilitavam as observações, trazendo novos fatos para a discussão. Desde a Grécia Antiga os modelos em uso são modificados e caem em desuso, dando lugar para versões modificadas que se adequavam melhor ao momento corrente. O modelo Aristotélico foi e voltou diversas vezes, assim como o Epicuriano e estoico. O início do período moderno com a Renascença e o Iluminismo marcam o momento onde as observações e as explicações naturais

começaram a ter um peso maior na escolha dos modelos em uso. Isso foi possível não só pelas observações, mas também pelo desenvolvimento da mecânica com os trabalhos de Descartes e Newton, permitindo que conceitos antes impossíveis fossem agora usados, como a interação de forças gravitacionais em longas distâncias permitidas pela Gravitação Universal.

2.3.1 Modelo Newtoniano

Apoiado nos desenvolvimentos de René Descartes e outros estudiosos antigos, Issac Newton deu o próximo grande passo na área. O trabalho extenso de Newton em mecânica criou o ambiente perfeito na época para a germinação da Física. Muitos consideram Newton o divisor de águas entre a Filosofia e a Física (filosofia natural). O desenvolvimento da mecânica deu explicação para vários fenômenos terrenos, dando motivo prático a curto prazo no uso da física. Logo em seguida, Newton utilizando de técnicas matemáticas desenvolvidas por ele mesmo, aliado com as observações do movimento celeste, principalmente as três leis de Kepler, desenvolveu a Teoria da Gravitação Universal, onde associava os movimentos celestes com as forças mecânicas conhecidas de seus trabalhos anteriores. Muitos dos conceitos foram baseados nos trabalhos de Robert Hooke, que propôs que os corpos celestes deviam suas orbitas curvas à força exercida pelo Sol. Hooke exemplificou isso com um pêndulo cônico, onde o Sol estaria no início do pêndulo e o corpo celeste na extremidade oscilante. A visão de Newton sobre o Universo mudou muito ao longo de sua vida, sendo que várias discussões foram importantes para estas mudanças, principalmente as indagações via carta de Robert Boyle sobre as consequências da Gravitação Universal em modelos cosmológicos Epicurianos. Boyle questionou primeiramente Newton sobre os efeitos da gravidade sobre um sistema finito de estrelas, expressando sua opinião que um universo com matéria autogravitante deveria ser aberto (infinito), impedindo que toda matéria entrasse em colapso em um só ponto, formando uma só esfera com a massa anteriormente distribuída. Em tal universo, a matéria estaria distribuída de tal forma que poderia colapsar não apenas em um ponto central, mas em vários pontos bastante distantes entre si, por todo espaço. Mas apesar de toda descrição mecânica do universo, Bentley argumentou que as partículas não possuiriam movimento algum, pois em um espaço infinito com infinitas partículas espalhadas de maneira homogênea, a força resultante em cada uma seria nula e não haveria movimento. Para responder isso, Newton atribuiu a uma força divina a causa de velocidades iniciais adversas, permitindo então o colapso gravitacional.

2.4 Cosmologia Moderna

Podemos separar a cosmologia antiga e Newtoniana da cosmologia moderna a partir dos grandes avanços trazidos pela Relatividade Geral de Einstein junto com diversas observações experimentais de fenômenos físicos extragalácticos, graças aos avanços instrumentais atingidos no início do século XX. Seguindo da Relatividade Geral, temos a proposta da expansão do universo, a criação do modelo do Big Bang, a descoberta da radiação cósmica de fundo, da matéria escura e da expansão *acelerada* do universo através dos levantamentos de supernova 1A, culminando no modelo cosmológico padrão. Toda a cosmologia atual, apesar de estar apoiada nas descobertas de milênios e séculos passados, é resultado da utilização do **Princípio Cosmológico** e das consequências do *Paradoxo de Olbers*. Caso encontrássemos alguma evidência que fosse contrária a estes princípios, teríamos que rever toda a cosmologia moderna.

2.4.1 Paradoxo de Olbers

Assim que a ideia que o universo era infinito e povoado por infinitas estrelas foi adotada como um modelo padrão de universo, o paradoxo do céu escuro se estabeleceu, o que chamamos hoje de Paradoxo de Olbers. Logo após a revolução Copernicana, ainda no século XVI, diversos pesquisadores refletiram sobre o motivo do céu noturno ser escuro: se o universo é infinito e povoado com infinitas estrelas, iríamos receber luz em todas as direções, o que faria o céu ser muito mais claro do que o céu diurno. A luz emitida sofre uma diluição geométrica proporcional ao inverso do quadrado da distância, mas a área de uma esfera em torno da Terra é proporcional ao quadrado da distância (Fig 2.11). O que aconteceu com toda a luz que deveria chegar até nós? Uma explicação que suportasse o modelo de universo corrente e que resolvesse o paradoxo era necessária. Durante os séculos seguintes, muitas pessoas tentaram desenvolver uma solução para o problema, mas grande parte delas não estava correta. Uma das primeiras propostas corretas de solução foi feita por Heinrich Olbers, atribuindo a ausência da luz à absorção dela pelo meio intergaláctico. Apesar de sabermos hoje que essa é sim um dos motivos da ausência da luz, existiam argumentos contrários a essa ideia: uma hora o meio intergaláctico iria absorver energia suficiente e começaria a emitir luz também. O paradoxo só foi dado como resolvido efetivamente com a descoberta da expansão do universo no século XX, isso aliado com a velocidade finita da luz. Se o universo está se expandindo, o comprimento de onda da luz deverá aumentar com a expansão (sofrer redshift), fazendo as galáxias mais distantes não serem observadas a olho nu. A finitude da velocidade da luz ajuda

também a dar um basta no problema: a luz de galáxias muito distantes, fora do universo observável, não chegaria até nós. Esse problema motivou muitas pessoas, até mesmo fora do meio científico, como o escritor Edgar Allan Poe, que propôs em um de seus ensaios uma solução para o problema.

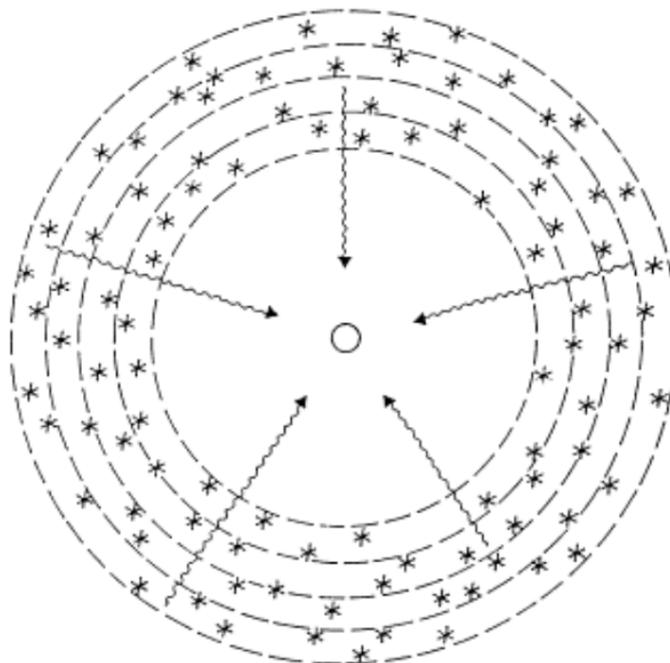


FIGURA 2.11: Diagrama de esferas concêntricas em torno da Terra povoadas por estrelas. Quando mais distantes as esferas, mais área para abrigar estrelas e mais luz emitiria, contrabalanceando a diluição geométrica da luz. Adaptado de [Harrison \(1990\)](#).

2.4.2 Princípio Cosmológico

Quando passamos dos modelos geocêntricos para os heliocêntricos após também a revolução Copernicana, a mentalidade da humanidade começou a mudar. Agora não estávamos mais no centro de tudo, mas fazíamos parte dele, assim como os outros planetas. As descobertas subsequentes ao heliocentrismo só reforçaram essa ideia: Hubble, por exemplo, descobriu que vivemos em um universo povoado de outras galáxias. Todo esse paradigma de abandono do antropocentrismo é conhecido como Princípio Copernicano e é aplicado extensivamente nas ciências: se uma teoria tem um ponto de vista privilegiado em detrimento dos outros, ela não é adequada. Isso tem como consequência um esforço para construir uma base pra todo pensamento científico que seja invariante e universal. Na Cosmologia isso não é diferente, o Princípio Cosmológico é uma extensão do Princípio Copernicano e supõe que o universo é homogêneo e isotrópico em grandes escalas

(> 100 Mpc) (Fig 2.12, Fig 2.13), ou seja, não há observadores nem direções privilegiadas no universo, ele parece o mesmo em todas as direções. Isso se tornou um pilar da cosmologia moderna pois é conveniente, suposições de homogeneidade e isotropia facilitam o desenvolvimento dos modelos cosmológicos.

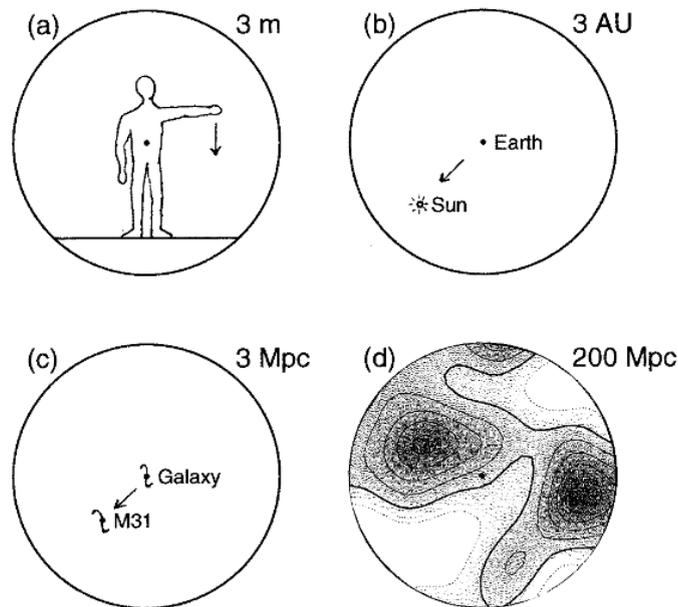


FIGURA 2.12: Até escalas menores que centenas de Mpc o universo é extremamente não homogêneo (a, b, c), mas a figura muda para escalas maiores (d). Adaptado de (Ryden, 200).

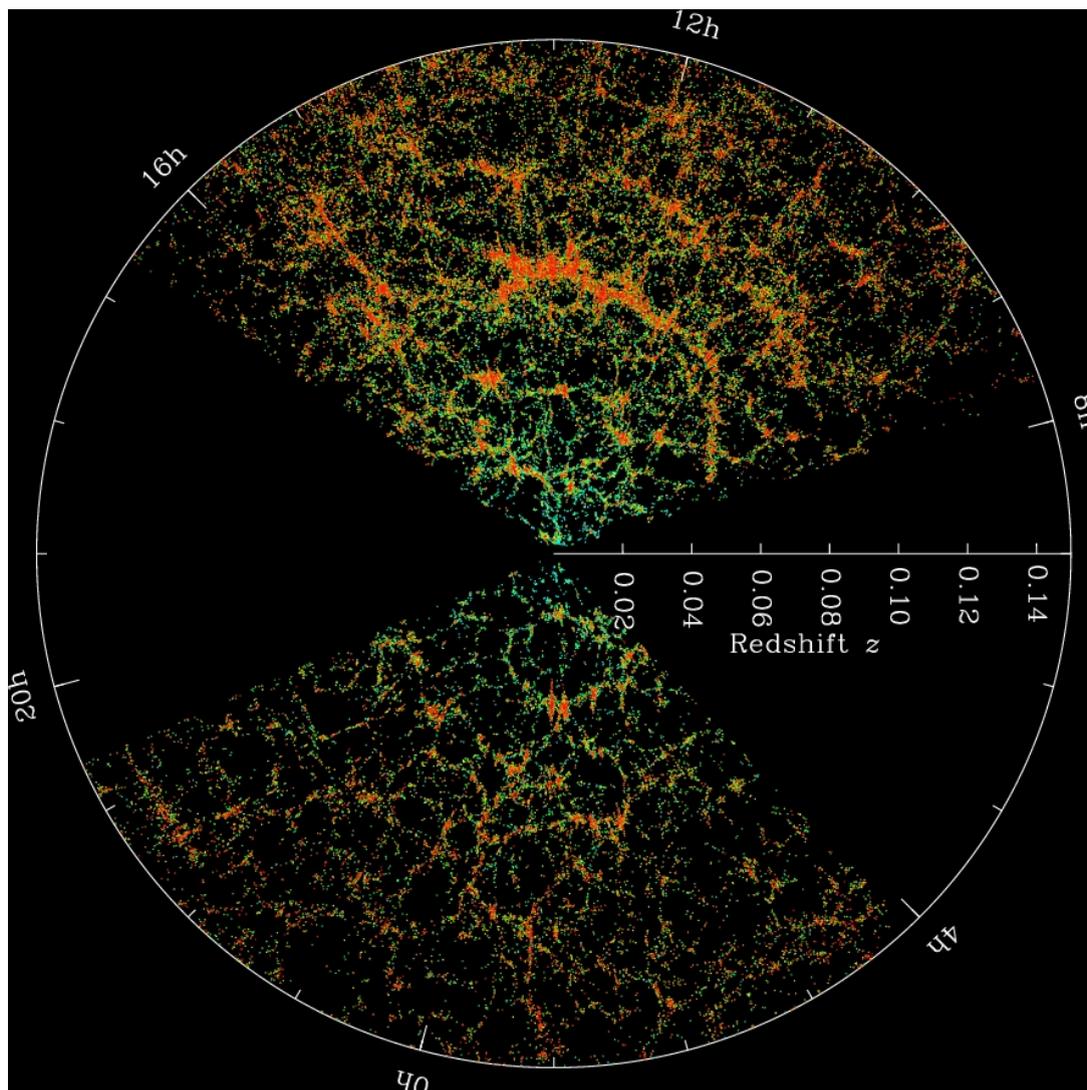


FIGURA 2.13: Distribuição de galáxias do levantamento SDSS. Universo em grandes escala aparenta ser homogêneo e isotrópico, uma escala grosseira para interpretar a imagem é $0.02 z \rightarrow 100 Mpc$. Faixas pretas são regiões não cobertas pelo levantamento. Fonte: Sloan Digital Sky Survey. Disponível em <http://blog.sdss3.org/>, acesso jan 2015.

Observações modernas, como a radiação cósmica de fundo e a distribuição de galáxias no universo, reforçam o Princípio Cosmológico. Caso alguma evidência contra ele surja, toda cosmologia atual deveria ser revista.

2.4.3 Einstein e Fridmann

Responsável por outra grande mudança de paradigma na cosmologia, Albert Einstein revolucionou o meio científico com várias contribuições significativas, tendo entre elas

a Relatividade Geral, solucionando alguns dos problemas com a Gravitação Universal. Suas famosas equações de campo são comumente escritas na seguinte forma tensorial (Harrison)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\frac{\Lambda}{c^2} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (2.2)$$

Em que $R_{\mu\nu}$ é o tensor de curvatura de Ricci, R é a curvatura escalar, $g_{\mu\nu}$ o tensor métrico e $T_{\mu\nu}$ o tensor de Energia-Momento. O termo de Λ , conhecido por 'constante cosmológica', foi introduzido por Einstein para contrabalancear os efeitos de expansão e contração permitidos sem o seu uso. Aqui, as palavras de John Archibald Wheeler exemplificam esta pequena equação de forma bastante simples e concisa: "*a matéria diz ao espaço como se curvar e o espaço diz à matéria como se mover*". De fato, como veremos mais tarde, os constituintes do Universo alteram a dinâmica do mesmo, influenciando como as distâncias são medidas. Mesmo com a RG sendo uma teoria matematicamente difícil de se trabalhar, a geometria do universo é uniforme em grandes escalas, permitindo que usemos soluções simples. O Princípio Cosmológico alidado das Eqs 2.2 e com a métrica

$$ds^2 = -c^2dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi) \right) \quad (2.3)$$

em que $a(t)^2$ é um parâmetro de escala, r , θ e ϕ as coordenadas esféricas usuais e k um parâmetro de curvatura, que pode assumir os valores $+1$, -1 e 0 , resultam nas equações de Friedmann, que descrevem como o parâmetro de escala $a(t)$ se comporta. A equação de Friedmann mais utilizada relaciona o $a(t)$ com a densidade de energia dos componentes do universo, e pode ser escrita como (Ryden, 200)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.4)$$

sendo ρ a densidade de energia total do universo correspondente à seus constituintes, excluindo a constante cosmológica, que já surge no último termo à direita. A métrica representada na Eq 2.3 é chamada de métrica de Friedmann-Robertson-Walker-Lemaître, ou somente *métrica FRWL*. Ela tem este nome por ter sido desenvolvida independentemente pelos 4 nomes, sendo que o último – Georges Lemaître – foi quem fez as primeiras propostas que seguiram na direção da teoria do Big Bang. Friedmann sofreu críticas diretas de Einstein, que relacionava as soluções que permitiam a expansão com apenas um modelo teórico de brincadeira, pois na época não existiam evidências que corroboravam os efeitos. Foi só em 1929 que através de Hubble e Vesto Slipher que as evidências surgiram. Infelizmente, Friedmann morreu em 1924, antes de ver seu trabalho ganhar a dimensão que ganhou após as descobertas de Hubble.

2.4.4 Big Bang e a expansão do universo

2.4.4.1 Vesto Slipher

Descrito pela primeira vez por Hippolyte Fizeau em 1848, o redshift se tornou essencial para a astrofísica e cosmologia. Fizeau percebeu o desvio das linhas do espectro de estrelas e associou o fenômeno ao efeito Doppler, já conhecido do estudo de ondas. É possível definir o redshift através do desvio de linhas de emissão ou absorção no espectro de uma galáxia ou estrela detectado com o padrão conhecido do laboratório. Seja uma linha emitida no comprimento de onda λ_e e detectada em λ_o , o redshift pode ser calculado como

$$z \equiv \frac{\lambda_e - \lambda_o}{\lambda_e} \tag{2.5}$$

Por estar diretamente ligado com a velocidade, o parâmetro é hoje uma das bases para extração de dados em sistemas cosmológicos. Em 1915, Vesto Slipher reportou a medida de velocidade de 15 galáxias espirais através de seus espectros (Slipher, 1915). Como podemos ver na figura 2.14, a maioria das galáxias tinha velocidade de recessão com relação a Terra, com apenas 3 galáxias se movimentando em nossa direção (entre elas a galáxia de Andrômeda).

N.G.C.	221	Velocity	— 300 km	} These nebulae are on the south side of the Milky Way.
	224 †		— 300	
	598		—	
	1023		+ 200 roughly	
	1068		+ 1100	
	7331		+ 300 roughly	} These are on the north side of the Milky Way
	3031		+ small	
	3115		+ 400 roughly	
	3627		+ 500	
	4565		+ 1000	
	4594		+ 1100	
	4736		+ 200 roughly	
	4826		+ small	
	5194		± small	
	5866		+ 600	

FIGURA 2.14: Tabela adaptada de Slipher (1915), mostrando 15 galáxias espirais e suas respectivas velocidades, medidas através do redshift nos respectivos espectros. Na tabela podemos notar a galáxia de Andrômeda (NGC 224) e seu característico *blueshift*.

Em 1917, Slipher compilou as velocidades para uma amostra de 25 galáxias (Slipher, 1917). Com estes dados, ele tentou relacionar a orientação (Fig 2.15) com a velocidade, fazendo a média para cada posição, tentando perceber se a forma como a galáxia estava posicionada tinha alguma relação com sua velocidade (Figura 2.16).



FIGURA 2.15: Slipher agrupou as galáxias espirais em três grupos dependendo de sua orientação. Na direita temos a NGC 3982, que aparece com a face virada completamente para o observador (*face on*); No centro temos a NGC 4565, com a borda orientada na linha de visada (*edge on*) e na direita temos a NGC 224 (Andrômeda) que possui uma posição intermediária entre os dois primeiros tipos.

Ele concluiu erroneamente que galáxias *edge on* estavam se afastando mais rapidamente do que os outros tipos (vide velocidade média de 760 *km/s*).

TABLE III.
VELOCITIES OF SPIRAL NEBULÆ GROUPED.

Face View Spirals.		Inclined Spirals.		Edge View Spirals.	
N.G.C.	Vel.	N.G.C.	Vel.	N.G.C.	Vel.
598	- 260 km.	224	- 300 km.	2683	+ 400 km.
4736	+ 290	3623	+ 800	3115	+ 600
5194	+ 270	3627	+ 650	4565	+ 1100
5236	+ 500	4826	+ 300	4594	+ 1100
		5005	+ 920	5866	+ 600
		5055	+ 450		
		7331	+ 500		
Mean.....	330 km.	560 km.	760 km.

FIGURA 2.16: Tabela adaptada de Slipher (1917) mostrando 25 galáxias espirais e suas respectivas velocidades, separadas por sua orientação: *face on* (esquerda), inclinadas (centro) e *edge on* (direita). Slipher tentou relacionar a posição com a velocidade, concluindo que as galáxias *edge on* se moviam mais rapidamente do que os outros tipos.

No mesmo trabalho, utilizando a distribuição das galáxias da amostra e de suas respectivas velocidades, tentou estimar uma velocidade e uma direção de movimento para nosso próprio sistema, contrariando a ideia da época de estaríamos fixos no espaço. Ele encontrou uma velocidade de 700 *km/s*, mas tinha consciência que sua amostra (e a péssima distribuição das galáxias dela no céu) era pequena para efetuar alguma conclusão mais verossímil. Porém, junto com a estimativa, Slipher reforça a ideia da teoria dos "universos ilha", onde cada chamada 'nebulæ' (antigo conceito de galáxia) era na verdade

um aglomerado de estrelas como o nosso próprio sistema. Esta conclusão aconteceu 8 anos antes de Hubble resolver as estrelas na galáxia de Andrômeda. Todos esses achados pavimentaram o caminho para Lemaître e o trabalho de Slipher aliado com o trabalho de Leavitt permitiram que Hubble mais tarde descobrisse que o universo estava na verdade em expansão.

2.4.4.2 Lemaître

Georges Lemaître foi um padre e físico belga que trabalhou em soluções das equações de campo de Einstein. Apesar da nacionalidade e de seus principais trabalhos serem publicados em francês, Lemaître interagiu com diversos astrônomos americanos durante o tempo que trabalhou no MIT, entre eles o próprio Vesto Slipher. De conhecimento das velocidades radiais das galáxias, em sua maioria recedendo da Terra, Lemaître em 1927 encontrou soluções das equações de campo de Einstein unindo modelos propostos por De Sitter e pelo próprio Einstein (Lemaître, 1927). As soluções eram análogas às encontradas por Alexandre Friedmann (as quais ele não tinha conhecimento), permitindo a expansão. As conclusões deste primeiro trabalho foram

- A massa do universo é constante e é relacionada com a constante cosmológica (na época chamada de constante de Einstein)
- O raio do universo cresce indefinitivamente a partir de um valor assintótico R_0 para $t = -\infty$
- As velocidades de recessão das galáxias são um efeito **cosmológico da expansão do universo**. Em sua publicação, Lemaître nos mostra a relação distância-velocidade pela primeira vez

$$v = \frac{rc}{R_0\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

Ele conseguiu prever com a Relatividade Geral as informações que Hubble mais tarde iria encontrar, dando o sentido correto para as velocidades de recessão mesmo com poucos dados para provar tal efeito. Em 1927, Hubble já tinha calculado as distâncias até M31 e M33, mas isso não era suficiente para gerar uma afirmação. Por Lemaître (1927) ter sido publicado em francês, a comunidade científica da época prestou pouca atenção ao trabalho pioneiro. Foi só depois das descobertas de Hubble através das estrelas cefeidas (?) que Lemaître com a ajuda de Arthur Eddington, traduziu o trabalho para o inglês. Em 1931, postulou sua teoria de "átomo primordial", onde em vez de iniciar de um universo com

tamanho finito como descrito pelos modelos de Einstein com raio R_0 , Lemaître postulou que devido a expansão, toda a matéria estava concentrada em único ponto no espaço, de onde a expansão começou (Lemaître, 1931) (Fig 2.17).

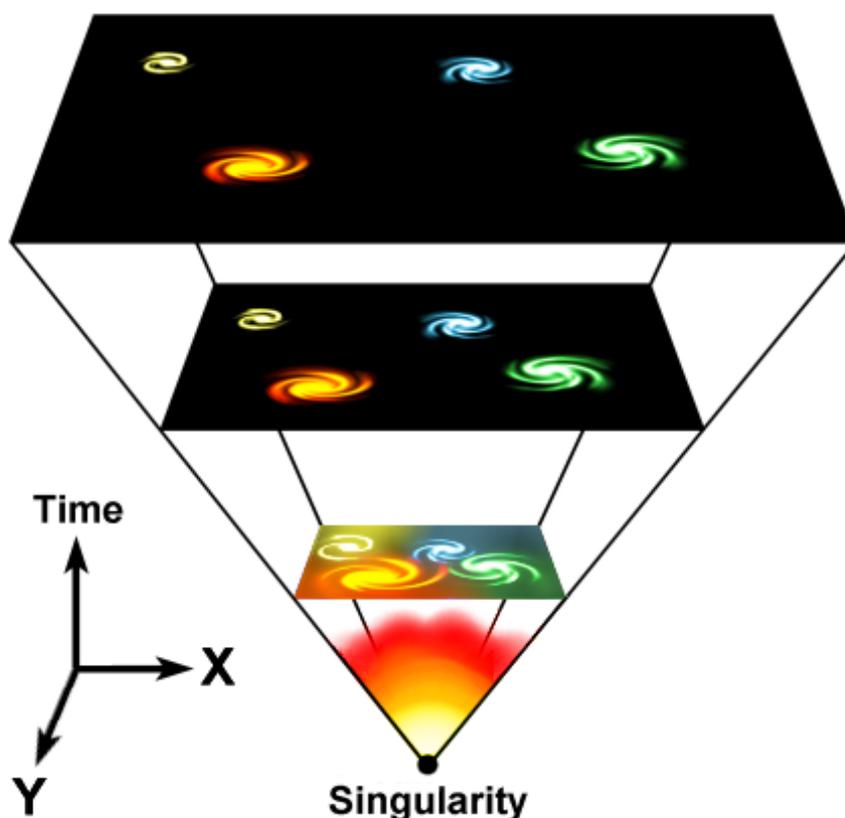


FIGURA 2.17: Diagrama de uma projeção 2D do espaço em expansão a partir de uma singularidade, com o movimento de recessão devido à expansão do espaço. Fonte: Wikipédia. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Georges_Lemaître>. Acesso jan. 2015.

Essa foi a primeira vez que uma teoria da forma do Big Bang é mencionada, fazendo contrapartida aos modelos de estado estacionário da época. Depois de participar de uma série de conferências e de expandir seu trabalho, incluindo uma interpretação da constante cosmológica como energia do vácuo, Lemaître ficou bastante reconhecido na comunidade científica, sendo considerado o pai da teoria do Big Bang – termo empregado pejorativamente por Fred Hoyle.

2.4.4.3 Leavitt e as estrelas cefeidas

As estrelas cefeidas permitiram que distâncias extragalácticas fossem medidas. Em 1908, Henrietta Leavitt publicou um catálogo com 1777 estrelas cefeidas observadas na Grande Nuvem de Magalhães (Leavitt, 1908). Destas estrelas, apenas 16 apareceram em diversas placas, possibilitando então a medição de seus respectivos períodos. Em 1912, mostrou que as estrelas variáveis com períodos mais curtos apresentavam brilho superficial menor (Leavitt and Pickering, 1912) (Fig 2.18), e como as estrelas estavam todas aproximadamente à mesma distância da Terra, uma relação entre as duas quantidades podia ser estabelecida.

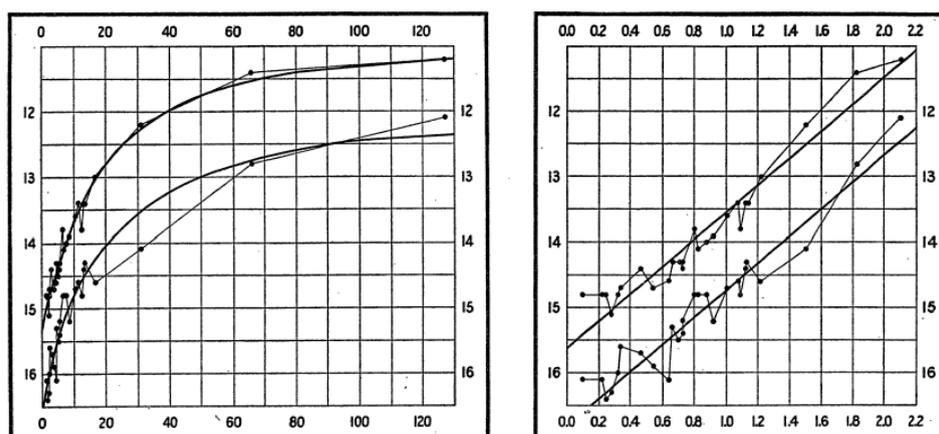


FIGURA 2.18: Gráficos adaptados de Leavitt and Pickering (1912). A figura da esquerda mostra a magnitude aparente versus o período em dias. A figura da direita mostra a magnitude versus o logaritmo do período, deixando claro a relação entre as duas quantidades.

Infelizmente, em 1912, a distância até a Grande Nuvem de Magalhães não era conhecida, e uma relação para a magnitude absoluta das Cefeidas – que possibilitaria a medida de distâncias – não era ainda possível. A magnitude aparente é uma medida do brilho aparente de estrelas, sendo da forma

$$m = -2.5 \log(F) + \text{const} \quad (2.7)$$

onde F é o fluxo. Já a magnitude absoluta se refere ao brilho de uma estrela em uma distância de 10 parsecs, tal que

$$M = -2.5 \log(F_{10pc}) + \text{const} \quad (2.8)$$

Se sabemos ambas magnitudes, sabemos a distância até o objeto. A magnitude aparente é medida diretamente, medindo o fluxo, mas a absoluta não pode ser medida desta forma. Através de uma distribuição de Stefan-Boltzmann, considerando a estrela um corpo negro, temos que o fluxo emitido por ela segue a relação

$$F = \sigma T^4 \quad (2.9)$$

e que a luminosidade obtida segue a relação

$$L = 4\pi r^2 F \quad (2.10)$$

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann, T a temperatura e R a distância entre o observador e a estrela. Se agora fizermos $m - M$ obteremos o que é conhecido por módulo de distância

$$m - M = 5 \log(r/10) \quad (2.11)$$

em que r é a distância em parsecs do observador até a estrela. Mais tarde, Hertzsprung, Russel e Shapley tentaram calibrar a relação $m - P$ para uma relação $M - P$. Apesar de passar por diversas modificações ao longo do tempo, a relação dava uma boa estimativa de distância, algo muito difícil de medir por outros métodos. Agora, com o período e a magnitude aparente, encontramos a relação $m - M$ e a distância até a cefeida, permitindo determinarmos a distância da galáxia ou aglomerado onde ela se encontra. Esse conhecimento se mostrou extremamente importante, pelo qual Hubble fez as primeiras medidas de distâncias extragalácticas e chegou na sua relação linear entre distância e velocidade (anteriormente proposta por Lemaître), conhecida atualmente como **Lei de Hubble**.

2.4.4.4 Edwin Hubble

Hubble foi um astrônomo americano, passando a maior parte da sua vida trabalhando no Monte Wilson, com o recém-criado telescópio refletor de 100 polegadas. Utilizando este equipamento extremamente sofisticado para época, dedicou sua vida em determinar quais objetos celestes faziam parte da Via Láctea. Para tal, em 1925 determinou as distâncias de várias cefeidas em M31 e M33 através de uma relação Período-Luminosidade (Hubble, 1926) criada por Stanley, seguindo o conhecimento apresentado na sessão anterior. As distâncias estimadas foram de cerca de 935.000 anos-luz. Neste mesmo trabalho, Hubble cita que cefeidas foram encontradas em outros objetos, mas que ele ainda não tinha imagens suficientes para estimar o período. Em 1929, Hubble juntou o trabalho de Vesto

nas velocidades de recessão, medidas através do redshift, e suas estimativas de distância usando as Cefeidas (Hubble, 1929). Para sua surpresa, a relação entre as duas quantidades era linear, onde quanto mais longe estavam os objetos, mais rápido estavam se afastando (Fig 2.19). A relação conhecida hoje por Lei de Hubble é da forma

$$V = H_0 D \quad (2.12)$$

ou com o redshift

$$z = \frac{H_0 D}{c} \quad (2.13)$$

em que H_0 é a constante de Hubble, com valor atual de (Pla)

$$H_0 = 67.80 \pm 0.77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad (2.14)$$

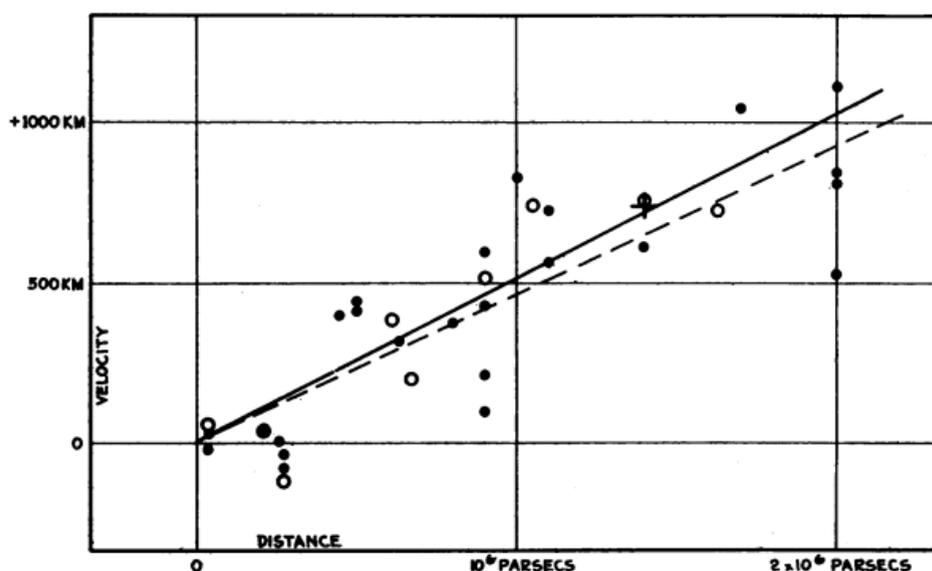


FIGURA 2.19: Relação entre velocidade e distância. Velocidade em km/s pela distância em parsecs. Adaptado de Hubble (1929).

Apesar de ter superestimado as distâncias comparado com os dados atuais, o trabalho de Hubble foi essencial para fortalecer o modelo proposto por Lemaitre, que era rejeitado até então por falta de evidências. Este foi o passo que faltava na direção dos modelos que permitiam a expansão do universo, modificando a visão de toda comunidade científica sobre o assunto, já que diversas mentes da época apoiavam o modelo de estado estacionário (*Steady-state Model*), não só pela falta de evidências, mas porque o modelo Big Bang até então possuía diversos problemas. O físico russo George Gamow contribuiu enormemente

para solucionar alguns desses problemas, como uma explicação para a origem dos elementos químicos (Gamow, 1946). O que mais tarde favoreceu a teoria do Big Bang foi a descoberta da radiação cósmica de fundo, um resíduo térmico da época em que o universo era dominado pela radiação. Alpher (orientando do Gamow) e Herman previram que esse resíduo poderia ser medido na forma de um corpo negro e teria alguns graus Kelvin, com um pico em comprimentos de onda da ordem das micro-ondas (Alpher and Herman, 1948). Apesar da previsão, isso só foi medido acidentalmente em 1964.

2.4.5 Radiação cósmica de fundo

Em 1964, Arno Penzias e Robert Wilson, que trabalhavam no *Bell Laboratories*, estavam testando uma nova antena (Fig 2.20) de precisão feita para detectar o sinal vindo de satélites em forma de balão utilizados na época. Diversos cuidados para evitar ruídos foram tomados e mesmo assim um erro de quase 100 vezes o esperado foi encontrado.

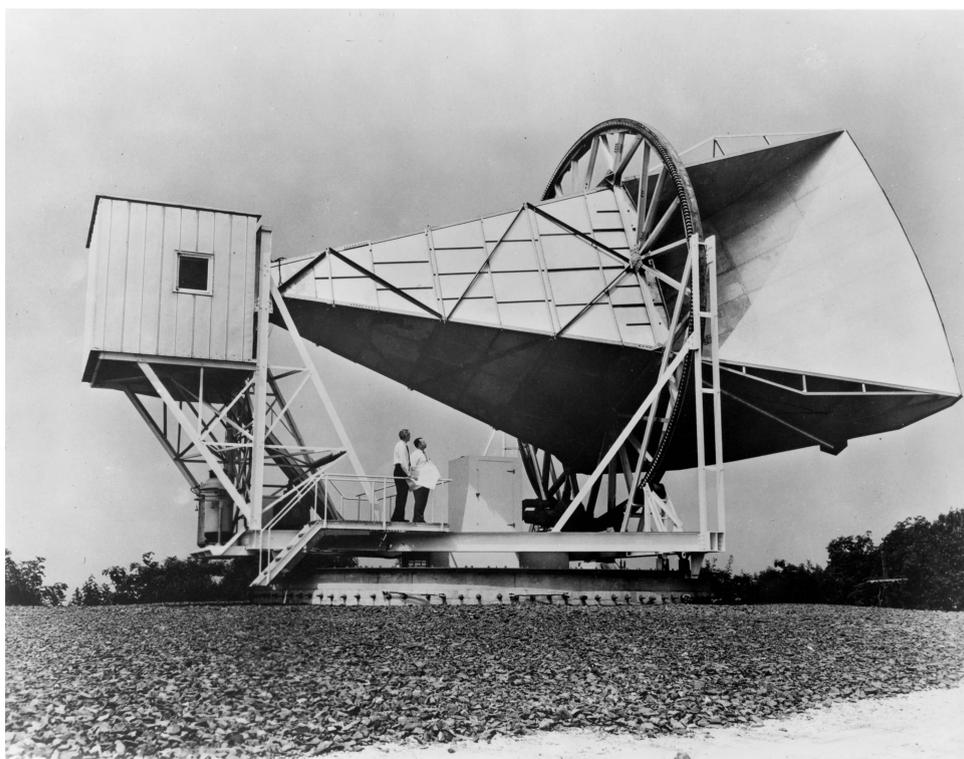


FIGURA 2.20: A antena *Holmdel Horn* com a qual Penzias e Wilson detectaram a radiação cósmica de fundo. Fonte: Great Images in NASA. Disponível em <<http://grin.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2003-00013.html>>. Acesso em jan. 2015.

Simultaneamente, Robert Dicke, Jim Peebles, e David Wilkinson da universidade de Princeton estavam se preparando para tentar medir a radiação cósmica de fundo (CMB – *Cosmic Microwave Background*) e Bernard Burke do MIT, que conhecia Penzias, Wilson e também o grupo de Princeton, avisou que o erro encontrado com a antena era compatível com o que o grupo esperava encontrar para o sinal do CMB. Em 1965, Penzias e Wilson publicam seus resultados (Penzias and Wilson, 1965), atribuindo sua natureza a uma radiação cósmica de fundo, dando créditos ao grupo de Princeton. Essa foi uma descoberta extremamente importante para toda a Cosmologia e Astrofísica, pois estabelecia o modelo do Big Bang como a teoria padrão para o universo em expansão e agora permitia que diversas características do universo fossem estudadas com a investigação da radiação cósmica de fundo, que era isotrópica assim como previsto. Com a descoberta, sondas foram projetadas para estudarem o CMB, como o COBE, o WMAP e o Planck. As primeiras medidas efetuadas pelo COBE demonstravam que a radiação cósmica de fundo seguia perfeitamente um ajuste de corpo negro como demonstrado na figura 2.21. Com sondas com cada vez mais precisão, é possível estudar hoje perturbações na ordem de $300 \mu K$, que apesar da radiação cósmica de fundo ser isotrópica e homogênea em grandes escalas, permitiram que estruturas colapsassem e se formassem, resultando nas galáxias que conhecemos. A figura 2.22 apresenta um mapa em alta resolução dessas perturbações.

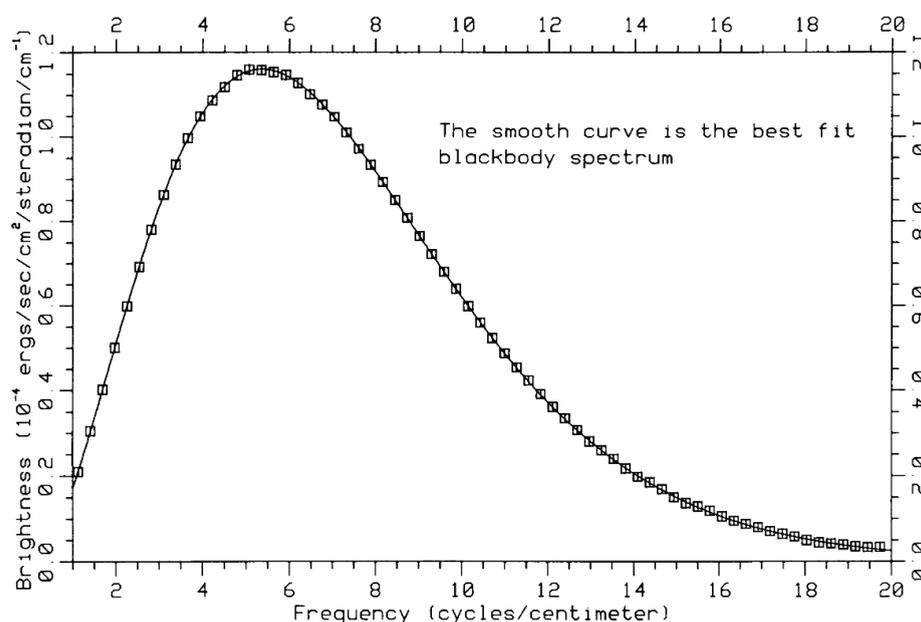


FIGURA 2.21: Ajuste de corpo negro para a radiação cósmica de fundo medida pelo COBE. As barras de erros configuram um erro de 1% nas medidas. Adaptado de Mather et al. (1990).

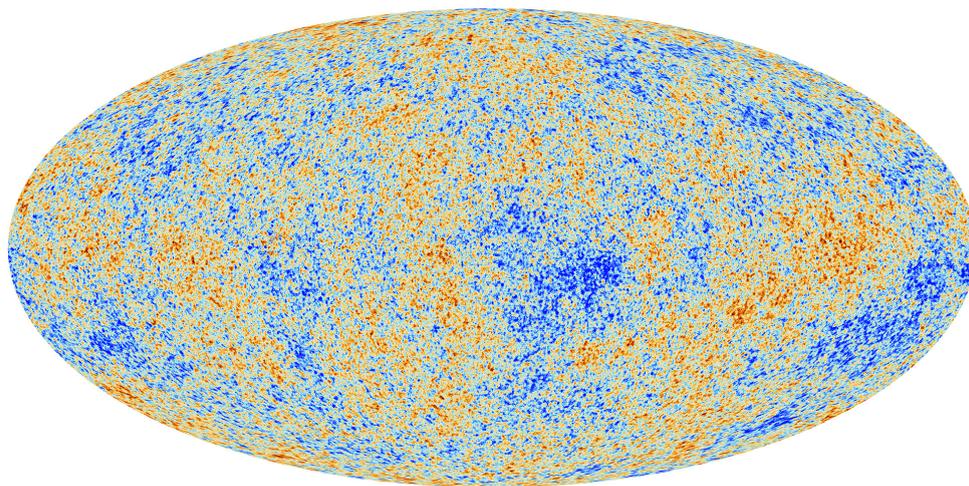


FIGURA 2.22: Perturbações na ordem de $300 \mu K$ na radiação cósmica de fundo. Fonte: European Space Agency. Disponível em <http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_reveals_an_almost_perfect_Universe>. Acesso em jan. 2015.

A radiação cósmica de fundo abriu as portas para a Cosmologia Observacional, permitindo que vários parâmetros cosmológicos pudessem ser medidos, como a constante de Hubble H_0 e o parâmetro de densidade de matéria Ω_m (Pla), o que refina modelos cosmológicos utilizados atualmente e serve de evidência para suportar o modelo padrão da cosmologia atual, o Λ CDM, que é dominado por Matéria Escura e Energia Escura. A descoberta desses dois componentes provocou as mudanças mais drásticas em toda Cosmologia desde a relação velocidade-distância de Hubble.

2.4.6 Matéria Escura

Ao estimar a massa do aglomerado de Coma em 1937, Zwicky descobriu que a massa do aglomerado correspondia a 500 vezes a massa luminosa que era observada (Zwicky, 1937), um fato totalmente inesperado. Apesar da sugestão já na década de 30, outras evidências para a discrepância entre a massa de galáxias e aglomerados e suas respectivas massas luminosas só vieram mais tarde, na década de 70, com a medida da curva de rotação da galáxia Andrômeda (Rubin and Ford, 1970) e outros estudos sobre a razão massa-luminosidade das galáxias (Ostriker et al., 1974; Einasto et al., 1974; Mathews, 1978).

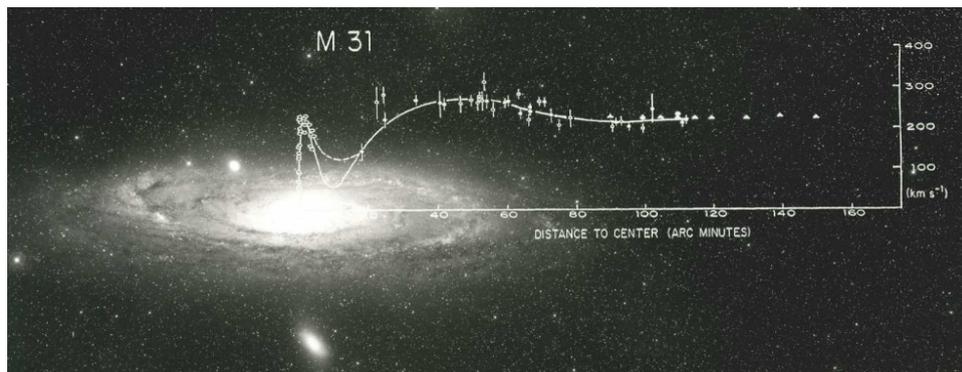


FIGURA 2.23: Curva de rotação para Andrômeda de (Rubin and Ford, 1970) sobreposto com a imagem da galáxia. A curva de rotação não segue o esperado: quanto mais distante do núcleo, mas lentas as estrelas deveriam se mover. A curva de rotação sugere que existe matéria não luminosa na galáxia. Adaptado de Primack (2009).

Ao fim da década de 70, os pesquisadores já concordavam com existência da matéria escura nas galáxias e aglomerados, mas sua natureza devia ainda ser discutida. Dois modelos surgiram imediatamente: a matéria escura quente (HDM, *Hot Dark Matter*) e a matéria escura fria (CDM, *Cold Dark Matter*). O modelo HDM tinha como peça central um neutrino leve como melhor candidato (Doroshkevich et al., 1981; Zeldovich et al., 1982), mas simulações com esse modelo produziram um universo muito mais não homogêneo do que o nosso White et al. (1983) (Figura 2.24).

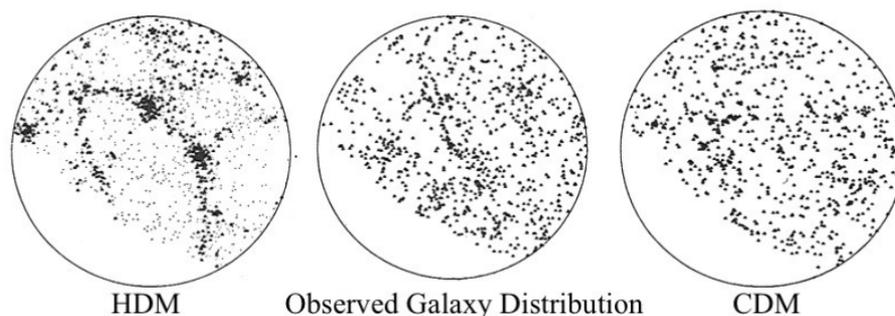


FIGURA 2.24: Distribuição das galáxias em um universo dominado por HDM (esquerda), distribuição de galáxias observadas no nosso universo (centro) e distribuição de galáxias em um universo dominado por CDM (direita). Adaptado de Primack (2009).

Em contrapartida com o HDM, diversos modelos foram propostos com uma partícula muito mais pesada que o neutrino da HDM, fazendo a partícula ser não relativística até mesmo na época do big bang, caracterizando o modelo como o CDM. Apesar de não haver consenso até hoje sobre do que é feita exatamente a matéria escura, há concordância sobre sua natureza: partículas pesadas, com pouca interação não gravitacional (Blumenthal

[et al., 1982](#); [Peebles, 1982](#)). Apesar de alguns trabalhos sugerirem que um universo dominado por constante cosmológica representasse bem os dados observados ([Turner et al., 1984](#)), foi só com a descoberta da expansão do universo acelerada que o modelo Λ CDM começou a ser estudado de verdade em detrimento dos dominados só por CDM ou uma combinação de matéria escura quente e fria. A maioria das simulações até 1997 eram feitas para encontrar os melhores parâmetros de densidade para os componentes de matéria bariônica, matéria escura fria e matéria escura quente.

2.4.7 Energia Escura

Em 1997, duas equipes distintas estavam tentando medir a relação de velocidade-distância para supernovas do tipo 1A, o *High-Z Supernova Team* e o *Supernova Cosmology Project*. Assim como as estrelas cefeidas, as magnitudes das supernovas tipo IA podem ser normalizadas de forma a funcionarem como velas padrão para a medição de distâncias. Com isso, os grupos conseguiram medir a relação velocidade-distância, tentando ajustar o melhor modelo cosmológico que produziria tal relação ([Riess et al., 1998](#); [Perlmutter et al., 1999](#)) (Fig 2.25). Para surpresa da comunidade científica, ambos trabalhos mostraram que o universo possui um componente dominante representado por uma constante cosmológica, ou pela conhecida hoje energia escura, que funciona como uma pressão negativa no universo em expansão, fazendo a expansão em si ser acelerada. O universo não está só se expandindo, mas está fazendo isso cada vez mais rápido.

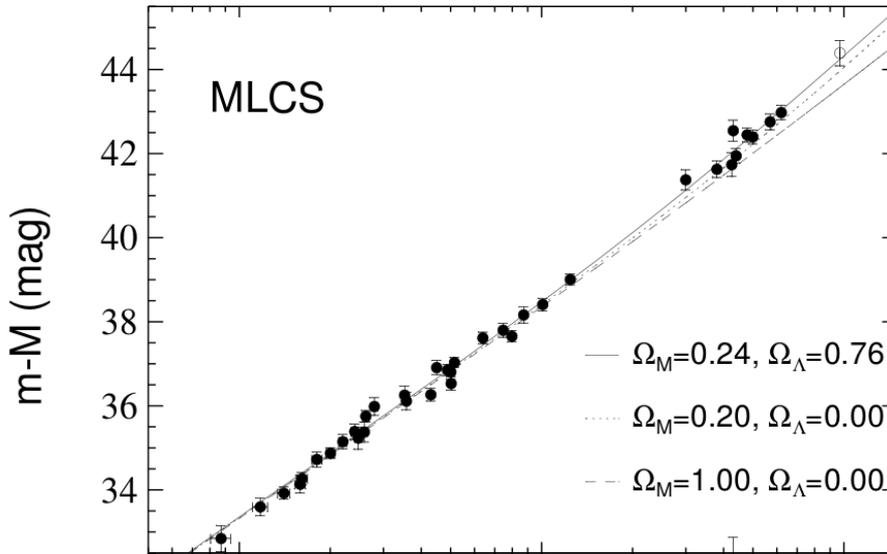


FIGURA 2.25: Diagrama de Hubble para as supernovas tipo IA em [Riess et al. \(1998\)](#). Os modelos que mais se adéquam aos dados para um universo plano são os com $\Omega_\Lambda = 0.76$ e $\Omega_M = 0.24$, valores muito próximos dos encontrados atualmente na radiação cósmica de fundo ([Pla](#)). Adaptado de [Riess et al. \(1998\)](#).

Essa descoberta estabeleceu o que chamamos hoje de modelo cosmológico padrão. Todos estudos posteriores da radiação cósmica de fundo confirmaram e melhoraram a precisão dos parâmetros cosmológicos do modelo. Agora, de posse de um modelo padrão e robusto, simulações da formação de estruturas em larga escala podem ser usadas para validar o modelo junto com as medidas da radiação cósmica de fundo. Como conhecemos os componentes que influenciam a dinâmica do universo, podemos agora medir distâncias cosmológicas utilizando as equações de Friedmann e a métrica de FRWL.

2.5 Modelo cosmológico padrão

Agora podemos desenvolver a equação de Friedmann utilizando a métrica de FRW para descrever como medimos distâncias em cosmologia. Sabemos que o modelo cosmológico padrão segue um modelo dominado por constante cosmológica Λ e matéria escura. Usando o fato de que o universo é plano ($k = 0$) na equação de Friedmann [2.4](#), obtemos

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_{\text{CDM}} + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.15)$$

e reescrevendo o lado direito como

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_{\text{CDM}} + \frac{\Lambda}{8\pi G}) \quad (2.16)$$

e definindo

$$\rho_{\Lambda} = \frac{\Lambda}{8\pi G} \quad (2.17)$$

e

$$\rho = \rho_{\text{CDM}} + \rho_{\Lambda} \quad (2.18)$$

como um parâmetro de densidade total, podemos agora calcular qual é a densidade crítica do universo, aquela necessária para ele ser plano. A razão \dot{a}/a é também chamada de parâmetro de Hubble $H(t)$, fazendo

$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_{\text{crit}} \quad (2.19)$$

ou seja, a densidade crítica é dada por

$$\rho_{\text{crit}} = \frac{3H(t)^2}{8\pi G} \quad (2.20)$$

mas o parâmetro de Hubble $H(t)$ hoje é igual à constante de Hubble H_0

$$H(t=0) = H_0 \quad (2.21)$$

com isso podemos escrever a densidade crítica hoje em função da constante de Hubble

$$\rho_{\text{crit},0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (2.22)$$

e reescrever a equação de Friedmann em função da densidade crítica hoje, a constante de hubble e da densidade ρ , como

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{H_0^2}{\rho_{\text{crit},0}}\rho \quad (2.23)$$

Os parâmetros de densidade contidos em ρ podem depender do fator de escala a . Por isso, é conveniente escrever o valor de ρ hoje, já que o fator de escala hoje é definido como $a = 1$, assim

$$\rho_0 = \rho_{\text{CDM},0} + \rho_{\Lambda,0} \quad (2.24)$$

mas como o universo é plano, ρ_0 precisa ser igual à densidade crítica, ou seja

$$\frac{\rho_0}{\rho_{\text{crit}}} = \frac{\rho_{\text{CDM},0}}{\rho_{\text{crit}}} + \frac{\rho_{\Lambda,0}}{\rho_{\text{crit}}} = 1 \quad (2.25)$$

assim conseguimos definir os convenientes **parâmetros de densidade**, que são os parâmetros adimensionais utilizados na literatura para representar a parcela de cada componente que contribui na dinâmica do universo

$$\Omega_{\text{CDM},0} = \frac{\rho_{\text{CDM},0}}{\rho_{\text{crit}}} \quad (2.26)$$

e

$$\Omega_{\Lambda,0} = \frac{\rho_{\Lambda,0}}{\rho_{\text{crit}}} \quad (2.27)$$

Utilizando agora o fato de que a densidade de energia de matéria dilui com o volume a^3 e que a densidade de energia da constante cosmológica é constante, podemos reescrever a equação de Friedmann como

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2(\Omega_{\text{CDM},0}a^{-3} + \Omega_{\Lambda,0}) \quad (2.28)$$

ou na forma compacta

$$\frac{\dot{a}}{a} = H(t) = H_0 E(a) \quad (2.29)$$

em que $E(a)$ é

$$E(a) = \sqrt{(\Omega_{\text{CDM},0}a^{-3} + \Omega_{\Lambda,0})} \quad (2.30)$$

Agora, se voltarmos na métrica apresentada na eq 2.3, adaptando ela para um universo plano ($k = 0$), temos

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 (dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi)) \quad (2.31)$$

e sabendo que um fóton viaja em uma geodésica nula no espaço-tempo $ds^2 = 0$, $d\theta = 0$ e $d\phi = 0$, obtemos a seguinte relação para dr

$$dr = \frac{cdt}{a(t)} \quad (2.32)$$

mas levando em conta a eq 2.29, podemos escrever

$$dt = \frac{da}{aH_0 E(a)} \quad (2.33)$$

substituindo em dr e integrando nos dois lados, temos

$$D = \frac{c}{H_0} \int_{a_e}^{a_0} \frac{da}{a^2 E(a)} \quad (2.34)$$

em que D é a distância percorrida por um fóton no intervalo integrado. Como estamos trabalhando com distâncias até galáxias, é conveniente usar o redshift como referência da distância ao invés do fator de escala a , essas duas quantidades se relacionam como

$$a = \frac{1}{1+z} \quad (2.35)$$

e fazer essa mudança de variáveis transformará D em

$$D = -\frac{c}{H_0} \int_z^0 \frac{dz}{E(z)} \quad (2.36)$$

mudando o intervalo de integração, obtemos que a distância pode ser calculada através do redshift e dos parâmetros cosmológicos como

$$D = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{E(z)} = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{(\Omega_{CDM,0} z^3 + \Omega_{\Lambda,0})}} \quad (2.37)$$

essa equação é o que define o redshift como padrão de medidas de distância em astrofísica. As distâncias mudam com o modelo cosmológico, mas o redshift não, pois pode ser medido experimentalmente. Os valores de $\Omega_{CDM,0}$ e $\Omega_{\Lambda,0}$ hoje são 0.3175 e 0.6825 (Pl α), respectivamente. A integral 2.37 é resolvida numericamente. Todas outras medidas de distância em cosmologia são relacionadas com essa. Seguindo de Hogg (1999), temos que a distância de diâmetro angular D_A , definida como a razão entre o tamanho físico transversal de um objeto no céu e seu tamanho angular, é dada por

$$D_A = \frac{D}{1+z} \quad (2.38)$$

e a distância de luminosidade D_L , definida como a relação entre o fluxo bolométrico S e a luminosidade bolométrica L , é dada por

$$D_L = (1+z)D = (1+z)^2 D_A \quad (2.39)$$

As estimativas de distância cosmológicas utilizando o redshift são importantes para o trabalho pois queremos entender como nossas medidas morfométricas se relacionam com elas e qual o impacto provocado na morfologia de galáxias. A detecção de galáxias distantes em um universo que não segue uma expansão linear, descrito pela métrica de

FRW, não sofre só com a diminuição de resolução e problemas técnicos envolvidos com os telescópios, mas também com efeitos somente cosmológicos, como o escurecimento cosmológico do brilho superficial, conhecido como *cosmological dimming*, abordado na seção [3.3.1](#).

Capítulo 3

Morfologia de galáxias e as medidas morfométricas

With increasing distance, our knowledge fades, and fades rapidly. Eventually, we reach the dim boundary — the utmost limits of our telescopes. There, we measure shadows, and we search among ghostly errors of measurement for landmarks that are scarcely more substantial.

Edwin Hubble

No início do século 20, juntamente com a descoberta de que grande parte dos objetos conhecidos então como *Nebulae* eram na verdade objetos extragalácticos (Opik, 1922), hoje conhecidos como **galáxias**, surgiu a necessidade de uma classificação sistêmica capaz de abranger toda a variedade de formas e estruturas observadas nesses objetos. Uma das primeiras tentativas desse tipo de classificação visual foi feita por Hubble (Hubble, 1926) e é utilizada até hoje, conhecida como **sequência de Hubble**, onde galáxias elípticas são separadas das espirais através de um agrupamento de semelhança morfológica, com as galáxias lenticulares fazendo a ponte entre os dois tipos dominantes. Apesar de ser amplamente utilizada ainda hoje e representar bem a população de galáxias do universo local, a sequência de Hubble começou a ser menos eficiente ao representar as distribuições de galáxias distantes, como as encontradas no HDF (van den Bergh et al., 1996; Abraham

et al., 1996). Isso sugere que a distribuição morfológica de galáxias varia com a idade do universo (Abraham and van den Bergh, 2001), sendo que é possível observar objetos de quando o universo tinha apenas 30% da sua idade atual. Por estarmos hoje observando objetos muito distantes, é necessário tomar o cuidado adequado com nossas medidas e entender os efeitos que podem interferir nelas. Quanto mais distante, menor será a resolução das imagens, menor a proporção sinal ruído, maior o efeito da PSF e também teremos efeitos puramente cosmológicos, como o **escurecimento cosmológico**. Nessa seção, iremos abordar a sequência de Hubble – a principal forma de classificar galáxias – e alguns dos parâmetros usados para medir a estrutura e morfologia desses objetos, junto com uma breve discussão dos principais efeitos que podem influenciar nossas medidas. No fim, propomos uma forma de estudar o comportamento desses parâmetros em um ambiente controlado utilizando o FERENGI e o MORFOMETRYKA.

3.1 A sequência de Hubble

Apesar de ser utilizada até hoje, a sequência de Hubble (Hubble, 1926) foi aprimorada por diversos trabalhos conforme mais dados com melhor resolução podiam ser obtidos, aumentando a amostragem estatística e diminuindo o intervalo entre os tipos morfológicos. Dividindo a distribuição de morfologia em dois grandes grupos (**elípticas** e **espirais**), a sequência mostra um diagrama contínuo das variadas morfologias disponíveis, caracterizando as elípticas pela letra **E** seguido da elipticidade sem o ponto decimal. Ela é definida como

$$e = 1 - \frac{b}{a}$$

em que b e a são o eixo menor e eixo maior da galáxia, respectivamente. Assim, as elípticas são definidas como **E0**, **E1**, ..., até **E7**, indo das galáxias totalmente globulares até as elipsoidais, como exemplifica a figura (3.1).



FIGURA 3.1: Algumas galáxias elípticas da amostra utilizada no presente trabalho em ordem de elipticidade com suas respectivas nomenclaturas na sequência de Hubble.

Já as espirais são divididas em dois grupos (o que caracteriza a sequência como um diapasão), sem barra e com barra, caracterizadas por **S** e **SB** respectivamente. As suas subcategorias são separadas por letras em minúsculo, onde em geral são utilizadas as letras **a**, **b**, **c**, indo de galáxias com espirais pouco definidas e com menos conteúdo de gás, denotadas por **Sa/SBa**, até as com braços espirais mais definidos e com mais gás e poeira, denotadas por **Sc/SBc**. A letra **b** caracteriza uma morfologia intermediária entre os dois tipos. Apesar de representar bem as galáxias encontradas, um pequeno grupo ainda foi separado da sequência e denotado por galáxias irregulares e peculiares, que não apresentavam estrutura bem definida que se encaixa nos tipos anteriores, denotada hoje como **Irr**. Com a melhoria na capacidade dos equipamentos, estruturas menores começaram a ser melhor resolvidas nas imagens. Com isso, o próprio Hubble fez uma revisão da sequência ([Hubble, 1936](#)) introduzindo as galáxias lenticulares, que são apresentadas como galáxias intermediárias entre as elípticas e espirais, com característica de disco (presente nas espirais) mas com pouco gás e poeira (característica das elípticas), com pouca formação estelar, sem apresentar estruturas espirais. Essa nova classe foi denotada por **S0**. A figura (3.2) demonstra os tipos citados.

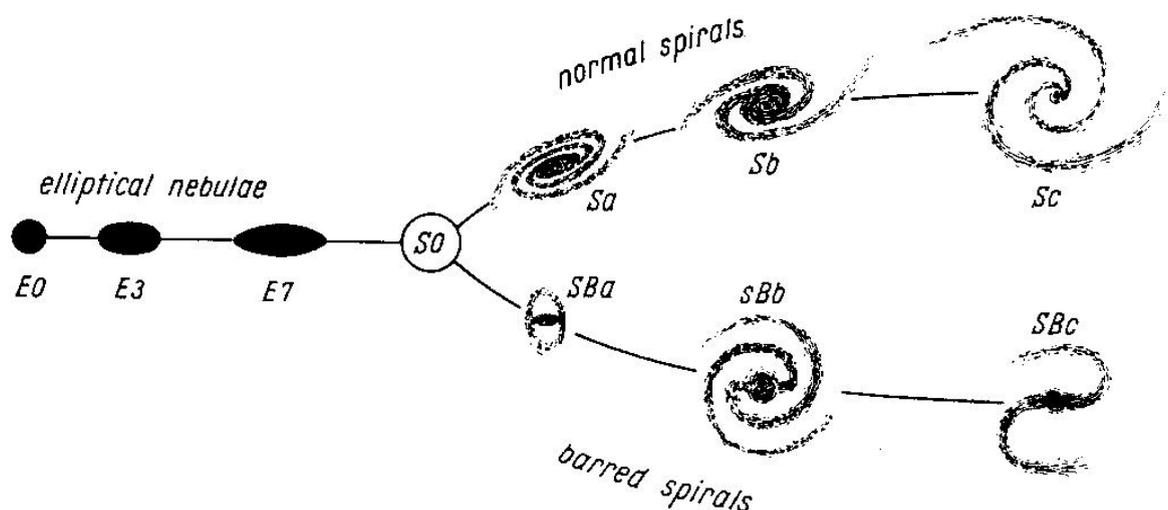


FIGURA 3.2: Diagrama da classificação de Hubble, com elípticas na esquerda, variando em elipticidade, e as espirais na direita, variando nas estruturas espirais e barras. Adaptado de [Hubble \(1936\)](#).

Apesar de caracterizar a maioria dos tipos encontrados, as definições estabelecidas para as galáxias espirais eram muito abrangentes. O aumento no número e na qualidade das imagens disponíveis permitiu que essas categorias fossem restabelecidas com algumas novas subdivisões através de expansões da sequência de Hubble, como [Vaucouleurs \(1959\)](#) e

de [Vaucouleurs et al. \(1991\)](#), que incluem uma classificação numérica para os tipos morfológicos, indo de -6 a 11, onde os números de -6 a -3 caracterizam as galáxias elípticas da sequência, -2 a 0 as galáxias lenticulares, de 1 a 7 as galáxias espirais e de 8 a 11 as galáxias irregulares e peculiares. Essa classificação numérica é extremamente conveniente para agruparmos um grande número de dados de galáxias de forma automática, permitindo também que galáxias possuam tipos intermediários que não existem na nomenclatura original. Essas revisões do sistema de Hubble – conhecidas também como sistema de de Vaucouleurs – introduzem novos tipos entre as categorias estabelecidas e adicionam grupos de transição entre as mesmas. Uma discussão profunda sobre cada tipo da sequência de Hubble está fora do escopo do presente trabalho, sendo que vamos utilizar a principal característica da sequência original: a divisão entre dois grandes grupos, **Elípticas** e **Espirais**. Em nossa análise posterior, consideraremos as galáxias lenticulares também como parte do grupo composto pelas elípticas. Mesmo em regime simplificado como esse, a sequência de Hubble é importante para demonstrar a divergência entre a morfologia em altos redshifts e a morfologia do universo local. Para exemplificar essa diferença, a figura (3.3) mostra a galáxia local *Tadpole* (UGC 10214) e galáxias marcadas como semelhantes a ela em altos redshifts no HUDF.

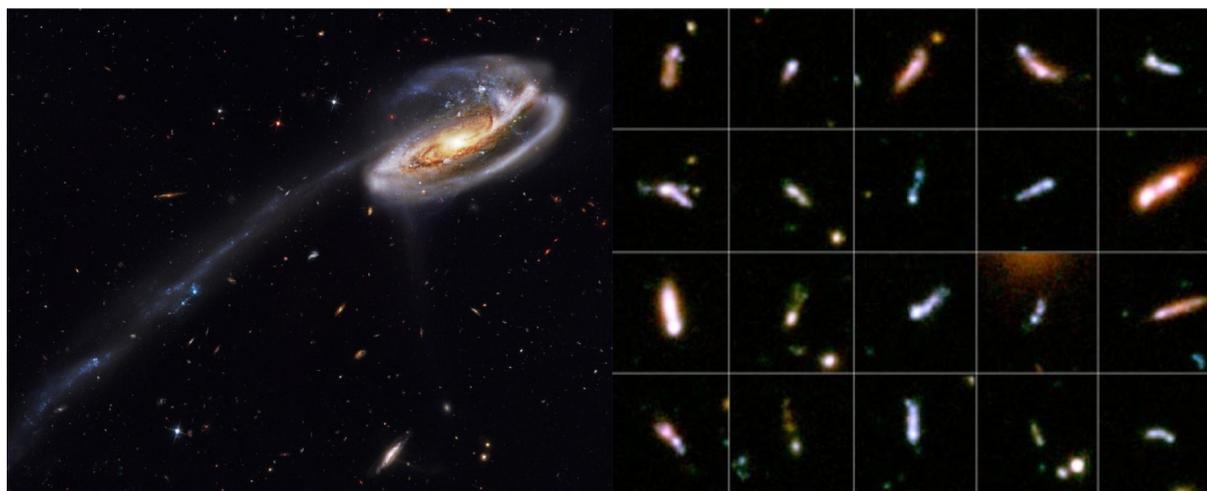


FIGURA 3.3: Galáxia Tadpole (esquerda) do universo local e galáxias marcadas como semelhantes à Tadpole no HUDF adaptadas de [Straughn et al. \(2006\)](#) (direita). Fonte: Hubble Legacy Archive. Disponível em <<http://apod.nasa.gov/apod/ap121108.html>>. Acesso jan. 2015.

3.2 Parâmetros morfométricos

Como estamos interessados em medir a morfologia em redshifts altos, é preciso utilizar medidas que de preferência não dependam da resolução e escala da imagem. Ideias de medidas paramétricas são atribuídas aos perfis de brilho que serão abordadas a seguir e as não paramétricas emergiram com as tentativas de medir as concentrações das galáxias. As medidas não paramétricas não foram difundidas até o meio da década de 90 com os dados então disponíveis pelo HST. Nessa época, começou o que se consolida hoje como sistema **CASGM** (**C**oncentração, **A**ssimetria, **S**uavidade, **C**oeficiente de **G**ini e **M**omento de **B**rilho), uma das nossas abordagens para medidas morfométricas. Todas essas técnicas foram iniciativas com objetivo de criar um rumo diferente para a morfologia visual, àquela na qual os objetos são classificados à olho, incluindo projetos modernos de Citizen Science, como o **Galaxy Zoo**¹, abordando o problema de maneira mais quantitativa.

3.2.1 Perfis de Brilho

Como uma das primeiras formas de medir a estrutura de galáxias, perfis de brilhos foram criados para descrever o comportamento da luz proveniente desses objetos em função do raio. A medição é feita através da média da intensidade da galáxia em uma elipse em dado raio, criando um ajuste para a distribuição de luz. A primeira descrição desses perfis é dada por de Vaucouleurs (de Vaucouleurs, 1948) e depois generalizada por Sérsic (Sérsic, 1963) na forma

$$I(R) = I_n \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{R}{R_n} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\} \quad (3.1)$$

em que n dá o comportamento do perfil enquanto o b_n normaliza o parâmetro R_n como o raio que engloba 50% de toda intensidade da galáxia. O perfil de de Vaucouleurs utilizado para descrever galáxias elípticas massivas tinha $n = 4$ e um perfil com $n = 1$ descreve um componente exponencial, como os discos exponenciais encontrados nas galáxias espirais. Os parâmetros proporcionados pelos perfis de brilho são amplamente utilizados na literatura, sendo que existem diversos algoritmos disponíveis e estabelecidos na área (Peng et al., 2002; Simard, 2010) que fazem essas medidas a partir da imagem do objeto.

¹www.galaxyzoo.com

3.2.2 Sistema CASGM

O sistema CASGM é resultado da criação de diversas medidas não paramétricas desenvolvidas por diversos autores ao longo das últimas décadas, como [Conselice \(2003\)](#); [Abraham et al. \(2003\)](#); [Lotz et al. \(2004\)](#). Essas medidas, diferentemente dos ajustes de perfis de brilho, não necessitam de um chute inicial no formato do objeto e são robustos para medir estruturas em baixas resoluções pelo mesmo motivo, sendo ideal para estudar a estrutura de galáxias em altos redshifts. A seguir descrevemos cada um dos parâmetros do sistema CASGM.

3.2.2.1 Concentrações

As medidas de concentração de luz das galáxias seguem a ideia de comparar a fração de luz no interior do objeto com as partes exteriores. Isso é geralmente feito ao selecionar dois raios, um interno e outro mais externo, contendo frações de luz da galáxia. O raio interno vai conter menos luz que o externo, mas a proporção entre essas quantidades pode dar a ideia de como ela está distribuída. A forma mais comum encontrada é

$$C = 5 \log \left(\frac{r_{\text{externo}}}{r_{\text{interno}}} \right) \quad (3.2)$$

em que esses raios geralmente englobam 20% e 80% da luz ou 90% e 50%, fazendo então

$$C_{28} = 5 \log \left(\frac{r_{80}}{r_{20}} \right) \quad (3.3)$$

e

$$C_{95} = 5 \log \left(\frac{r_{90}}{r_{50}} \right) \quad (3.4)$$

Quanto mais alto o valor da concentração, mais a luz da galáxia está espalhada em regiões centrais, devido a natureza da razão da medida. Um valor baixo indica uma galáxia com baixa concentração de luz. Esse parâmetro é bastante similar ao significado do índice de Sérsic n , pois o mesmo também mede como a luz se concentra no perfil de brilho.

3.2.2.2 Assimetrias

Os índices de assimetria nada mais são do que medidas da diferença da imagem original da galáxia comparada com uma rotação da mesma em 180° . É possível efetuar isso com mais de uma abordagem, com índices de correlação entre os pixels das duas imagens

e também por subtração direta, mas todos esses procedimentos devem ser feitos com cuidado, principalmente porque precisamos identificar de maneira adequada os limites da galáxia na imagem e efetuar um tratamento para o fundo, que poderá ter bastante influência no resultado final se não for levado em consideração. Esse parâmetro revela o quanto de luz é proveniente de fontes assimétricas no objeto (braços espirais, formação estelar, estruturas de gás e mergers, por exemplo). No presente trabalho, utilizamos duas abordagens, as quais chamamos A_1 e A_3 , respectivamente. A primeira segue da subtração direta entre a imagem original e a rotação da mesma, seguindo de (Conselice, 2014)

$$A_1 = \min \left(\frac{\sum |I_0 - I_{180}|}{\sum |I_0|} \right) - \min \left(\frac{\sum |B_0 - B_{180}|}{\sum |I_0|} \right) \quad (3.5)$$

em que I_0 é a imagem original e I_{180} a rotacionada. O segundo termo da equação é o ajuste para o ruído do fundo da galáxia, que também deve ser tratado da mesma maneira afim de ficarmos apenas com as medidas da luminosidade do objeto em questão. Já o parâmetro A_3 é o índice de correlação de Spearman e introduzido como medida de assimetria em (Cougo and Ferrari, 2013), não sendo comumente utilizado na literatura. O índice de correlação de Spearman é definido como um índice de correlação entre variáveis com posto, sendo

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_i^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.6)$$

em que n é o tamanho da amostra e d_i é a diferença $x_i - y_i$ entre os postos das duas variáveis a serem correlacionadas, no nosso caso, os fluxos dos píxeis entre a imagem original e a rotacionada.

3.2.2.3 Suavidade

A suavidade é um parâmetro que mede a fração de luz proveniente de pequenas estruturas na galáxia, como áreas de formação estelar. A definição do parâmetro em (Conselice, 2003) segue como

$$S = 10 \left[\left(\frac{\sum (I_{x,y} - I_{x,y}^\sigma)}{\sum I_{x,y}} \right) - \left(\frac{\sum (B_{x,y} - B_{x,y}^\sigma)}{\sum I_{x,y}} \right) \right] \quad (3.7)$$

em que I representa a imagem original e I^σ é a imagem original borrada através de um filtro afim de aumentar as pequenas estruturas. Isso faz da diferença $I - I^\sigma$ um mapa dessas estruturas. Apesar do nome *suavidade* sugerir que galáxias com um alto valor de S são suaves, é justamente o contrário. Partindo da definição acima de S , se uma galáxia

é totalmente suave (como grande parte das galáxias elípticas), a razão $(I - I^\sigma)/I$ será aproximadamente zero. Galáxias com um valor grande de S são galáxias com diversas estruturas pequenas. Ao medir esse parâmetro, mascaramos o centro da galáxia, pois as áreas no centro estão geralmente não resolvidas. Utilizamos uma abordagem parecida com a das assimetrias, o parâmetro S_1 é utilizado através da definição acima e o S_3 é medido através do índice de correlação de Spearman.

3.2.2.4 Coeficiente de Gini

O coeficiente de Gini, G , é uma estimativa estatística utilizada nas ciências econômicas para medir a distribuição de renda entre as pessoas de um país, sendo adaptado por (Abraham et al., 2003; Lotz et al., 2004) como uma medida morfométrica para medir a distribuição do brilho entre os pixels da galáxia. Ele é baseado na curva de Lorenz de uma distribuição, definida por

$$L(p) = \frac{1}{\bar{X}} \int_0^p F^{-1}(u) du \quad (3.8)$$

em que p é a porcentagem dos pixels menos brilhosos da galáxia, $F(u)$ é a função distribuição acumulada e \bar{X} a média do brilho de todos os pixels X_i . A medida de G é então feita ao efetuar a razão entre a área entre a curva de Lorenz da galáxia e a curva $L(p) = p$, representando a distribuição igualitária com área = 0.5. Como trabalhamos com uma distribuição discreta, podemos medir o coeficiente de Gini fazendo a diferença absoluta entre todos os pixels

$$G = \frac{1}{2\bar{X}n(n-1)} \sum_i^n \sum_j^n |X_i - X_j| \quad (3.9)$$

em que n é o número de pixels na imagem. Para uma distribuição igualitária do brilho entre os pixels, $G = 0$. Para uma distribuição onde todo o brilho é encontrado em apenas um pixel, $G = 1$ (Fig 3.4).

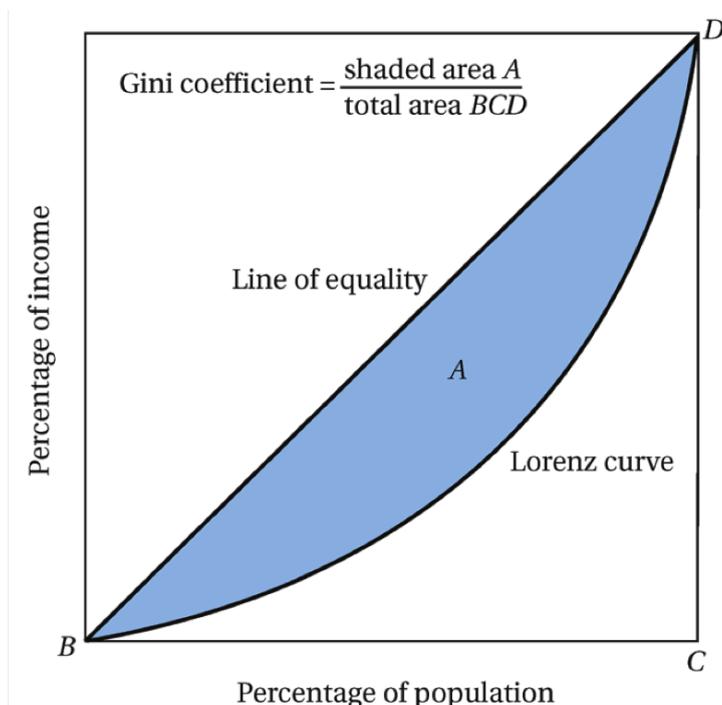


FIGURA 3.4: Gráfico entre a porcentagem de renda e a porcentagem da população caracterizando o coeficiente de Gini. O coeficiente é a razão entre a área da curva de distribuição igualitária e a curva de Lorenz e a área do triângulo BCD. O coeficiente é estendido para a morfometria ao relacionarmos a distribuição do brilho de uma imagem com a porcentagem dos pixels que englobam ela. Disponível em <<https://www.studyblue.com/notes/n/economics-final-exam/deck/2823256>>. Acesso jan. 2015.

Por medir a distribuição de luz na imagem, o coeficiente de Gini também se relaciona com os parâmetros de concentração C , pois galáxias muito concentradas possuem grande parte de seus brilhos concentrados em poucos pixels centrais. Apesar disso, o coeficiente de Gini é sensível a toda distribuição do brilho pois não precisamos assumir a simetria circular e central conforme o parâmetro C , podendo resultar em valores altos para concentrações de brilho fora do centro do objeto. Podemos diferenciar, por exemplo, galáxias com uma distribuição de brilho bastante uniforme (C e G baixos) e galáxias pouco concentradas mas com características bastante brilhantes não centrais (C baixo e G alto). Da mesma forma que os outros parâmetros, o coeficiente de Gini pode sofrer um viés caso o ruído e o fundo da galáxia não sejam tratados adequadamente, quanto maior o redshift, menor a resolução e o sinal ruído, fazendo a distribuição de brilho ser menos profunda e mais afetada por essas características.

3.2.2.5 M_{20}

O parâmetro M_{20} é definido como o momento de segunda ordem de 20% dos pixels mais brilhantes da galáxia. O momento de segunda ordem total é definido como

$$M_{total} = \sum_i^n f_i [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2] \quad (3.10)$$

onde temos a soma do brilho de cada pixel multiplicado pela sua distância até o centro (x_c, y_c) , definido de forma a fazer M_{total} ser mínimo. Para encontrarmos o momento de segunda ordem de 20% dos pixels mais brilhantes, é necessário ordenar os pixels em ordem decrescente e calcular seus respectivos momentos de segunda ordem até que seus brilhos somados atinjam 20% do brilho total f_{total} somando-os e normalizando pelo momento total M_{total}

$$M_{20} = \log \left(\frac{\sum_i^{20\%} M_i}{M_{total}} \right) \sum_i f_i < 0.2 f_{total} \quad (3.11)$$

em que M_i é o momento de segunda ordem do pixel com fluxo f_i . Apesar de ser semelhante com os parâmetros de concentração, não é necessário assumir qualquer simetria circular ou elíptica em sua medida, sendo que o centro da galáxia é um parâmetro livre, o que faz M_{20} ser muito mais sensível à mergers, sendo um parâmetro que também pode ser utilizado para galáxias irregulares e peculiares.

3.3 Efeitos adversos na morfometria

De posse de parâmetros morfológicos suficientemente robustos para efetuarmos as medidas em altos redshifts, onde a resolução e sinal ruído são baixos, podemos tentar entender os efeitos que o redshift provoca na morfometria através da simulação de tais efeitos utilizando o modelo cosmológico. Para evitar qualquer mistura entre os efeitos intrinsecamente evolutivos das galáxias e os efeitos de degradação da imagem, é possível abordar o problema simulando tais efeitos em galáxias locais, cujas morfologias são bem conhecidas e seguem de maneira esperada a sequência de Hubble. Além disso, podemos efetuar a simulação na mesma galáxia local para diversas distâncias diferentes utilizando o FERENGI e efetuar as medidas morfométricas com o MORFOMETRYKA, estudando o comportamento desses com o redshift. O primeiro passo em direção a este processo é entender os principais efeitos que podem afetar nossas medidas, sendo os principais deles o escurecimento cosmológico e os efeitos instrumentais da PSF e ruído.

3.3.1 Escurecimento Cosmológico

Seja m_i a magnitude aparente de uma galáxia local que queremos estudar, tal que

$$m_i = -2.5 \log(F_i) \quad (3.12)$$

e m_f a magnitude aparente da mesma galáxia local após a simulação do redshift

$$m_f = -2.5 \log(F_f) \quad (3.13)$$

a magnitude absoluta deve ser conservada fazendo

$$M = m_i - 5 \log(d_i) - c = m_f - 5 \log(d_f) - c \quad (3.14)$$

em que d_i e d_f são as **distâncias de luminosidade** (eq 2.39) do observador até a galáxia original e na galáxia com a simulação, respectivamente. Podemos escrever então que

$$m_i - m_f = 2.5 \log\left(\frac{F_f}{F_i}\right) = 5 \log\left(\frac{d_i}{d_f}\right) \quad (3.15)$$

$$\left(\frac{F_f}{F_i}\right) = \left(\frac{d_i}{d_f}\right)^2 \quad (3.16)$$

Rearranjando essa equação para o fluxo final F_f

$$F_f = F_i \left(\frac{d_i}{d_f}\right)^2 \quad (3.17)$$

e sabendo que as distâncias luminosas podem ser escritas em função das distâncias angulares (eq 2.39) e seus respectivos redshifts tal que

$$\frac{d_i}{d_f} = \frac{a_i(1+z_i)^2}{a_f(1+z_f)^2} \quad (3.18)$$

substituindo para o fluxo final, temos

$$F_f = F_i \left[\frac{a_i^2(1+z_i)^4}{a_f^2(1+z_f)^4} \right] \quad (3.19)$$

mas como a_i se refere à distância local, com redshift da galáxia local, podemos aproximar $z_i \approx 0$, fazendo

$$F_f = F_i \frac{a_i^2}{a_f^2} \frac{1}{(1+z_f)^4} \quad (3.20)$$

mostrando que o fluxo final da galáxia após a simulação decai por um fator $\propto (1+z)^{-4}$ e seus tamanhos angulares por $\propto (1+z)^2$, o que é conhecido na literatura por *escurecimento cosmológico* ou *cosmological dimming*. É esse efeito que faz galáxias em altos redshifts serem tão difíceis de serem observadas.

3.3.2 Efeitos instrumentais

Junto com os efeitos devido às distâncias cosmológicas, também temos que considerar os efeitos provocados por nossos instrumentos de detecção. Toda imagem obtida por instrumentos ópticos está sujeita ao efeito da *Point Spread Function* (PSF) e à ruído, seja ele externo ou por causa da contagem dos fótons no CCD. Em imagens com alta resolução e com um alto índice de sinal/ruído, esses problemas não são tão sérios, mas quando vamos para regimes de resolução baixa, esses efeitos podem ser bastante significativos, principalmente nas simulações efetuadas neste trabalho, onde imagens de galáxias locais ficam com uma resolução muito baixa, junto com um sinal/ruído também baixo. O comportamento dos parâmetros morfométricos em altos redshifts serão significativamente alterados por esses problemas.

3.3.2.1 PSF e Convolução

Uma PSF é uma função que descreve como um instrumento óptico detecta uma fonte pontual de luz. Ela leva em consideração não só os erros provocados pelo próprio instrumento e pela natureza difratória da luz, mas também para efeitos externos. Nos telescópios em terra, grande parte da PSF é devido à turbulência na atmosfera, chamado de *seeing* pelos astrônomos. A imagem obtida pelos telescópios é sempre uma convolução da imagem do objeto sendo detectado com a PSF do instrumento. A figura ?? mostra um exemplo hipotético da imagem de um objeto sem o efeito da PSF e depois com a convolução da PSF.

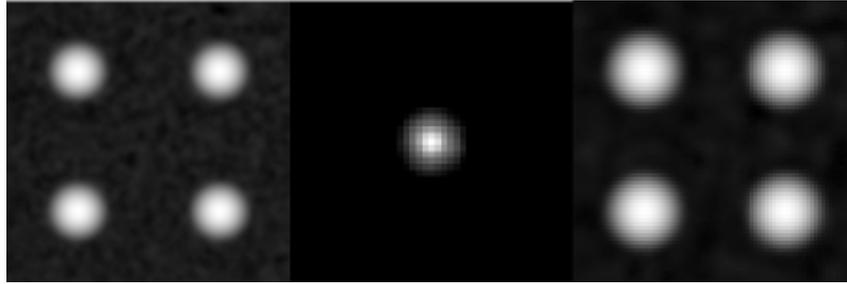


FIGURA 3.5: Imagem de um objeto gerado sinteticamente (esquerda), PSF (centro) e imagem do objeto sintético convoluido com a PSF. A PSF tende a aumentar e borrar os objetos em imagens. Fonte: elaborada pelo autor.

Os grandes levantamentos e catálogos astronômicos geralmente acompanham as imagens dos objetos celestes com suas respectivas PSFs, permitindo que os pesquisadores usem algoritmos de processamento de imagens para deconvoluir a PSF da imagem do objeto a fim de extrair qualquer efeito provocado na detecção do mesmo. Isso é feito geralmente através de transformadas de Fourier.

3.3.2.2 Ruído

Outros efeitos adversos, principalmente em imagens de galáxias distantes pouco brilhantes, é provocado pelo ruído. Ele é proveniente de uma variedade de fontes, como erros introduzido na detecção pelo CCD (*Poisson noise*, *readout noise*), interferência do fundo das galáxias e erros introduzidos pela luz de outras fontes espalhada na atmosfera.

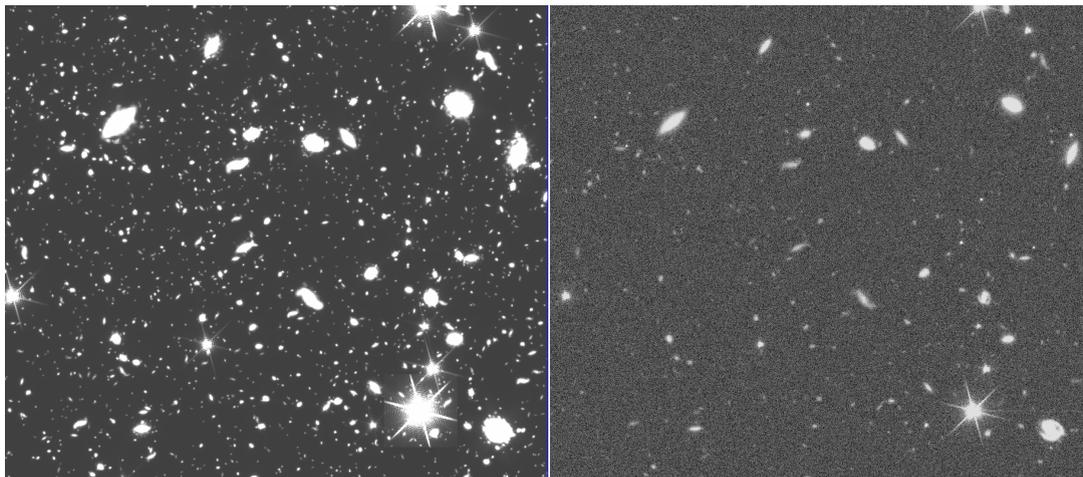


FIGURA 3.6: Imagem de um campo de galáxias simuladas pelo Euclid-VIS (Cropper et al., 2012) sem ruído (esquerda) e com ruído (direita). Objetos pouco luminosos acabam desaparecendo ou perdendo parte de suas características por causa do ruído.

Disponível em <<http://www.mssl.ucl.ac.uk/~smn2/>>. Acesso jan. 2015.

3.3.3 FERENGI e o redshift artificial de galáxias

É esperado que, em regimes de sinal ruído baixo, o comportamento dos parâmetros morfométricos sejam afetados significativamente pelo ruído e pela PSF. Para entender o comportamento desses parâmetros em tais situações, podemos simular esses efeitos em imagens de galáxias locais, onde a morfometria é bem definida, comparando os dados originais com o resultado das simulações. Isso pode ser feito através do FERENGI (*Full and Efficient Redshifting of Ensembles of Nearby Galaxy Images*) ???. Dado um redshift, ele aplica o modelo cosmológico padrão na imagem de uma galáxia local, simula os efeitos cosmológicos, faz a convolução com a PSF e aplica ruído de forma realista. O FERENGI simula como uma galáxia local iria ser observada caso estivesse mais distante de nós. Após a simulação do FERENGI, podemos extrair os parâmetros com o MORFOMETRYKA e comparar com os originais. Se fizermos isso com a mesma galáxia para diversas distâncias, conseguimos extrair o comportamento desses parâmetros.

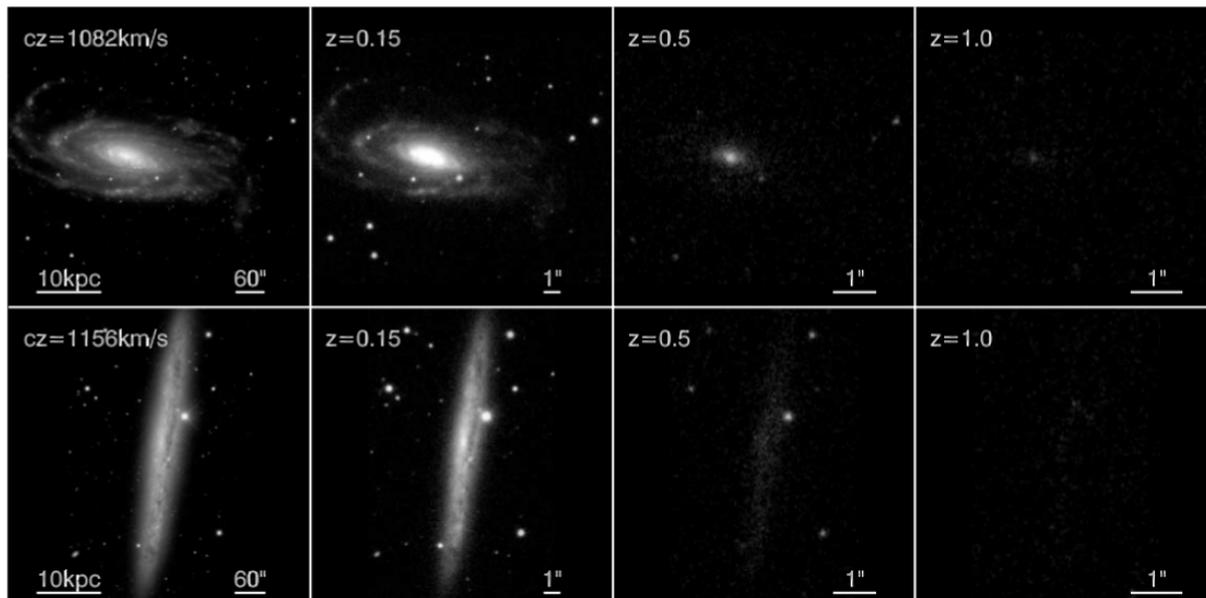


FIGURA 3.7: Exemplo de simulações feitas pelo FERENGI. Adaptado de [Barden et al. \(2008\)](#).

3.3.4 MORFOMETRYKA

O MORFOMETRYKA é um pacote de algoritmos desenvolvido para medições morfométricas ([Ferrari et al., 2015](#)). Para cada imagem de galáxia, ele subtrai o céu, encontra o objeto, mede o centro, os eixos da elipse e o ângulo de posição. Ele então efetua fotometria de abertura e ajusta um perfil de Sérsic para o perfil de brilho da galáxia. Medindo então o raio Petrosiano, concentrações, assimetrias, suavidades, coeficiente de Gini e o momento de brilho de segunda ordem (Fig 3.8). Dessa forma, podemos utilizar o Morfometryka para extrair os parâmetros morfométricos de todas as imagens das simulações do FERENGI, nos possibilitando entender o comportamento desses parâmetros ao longo do redshift.

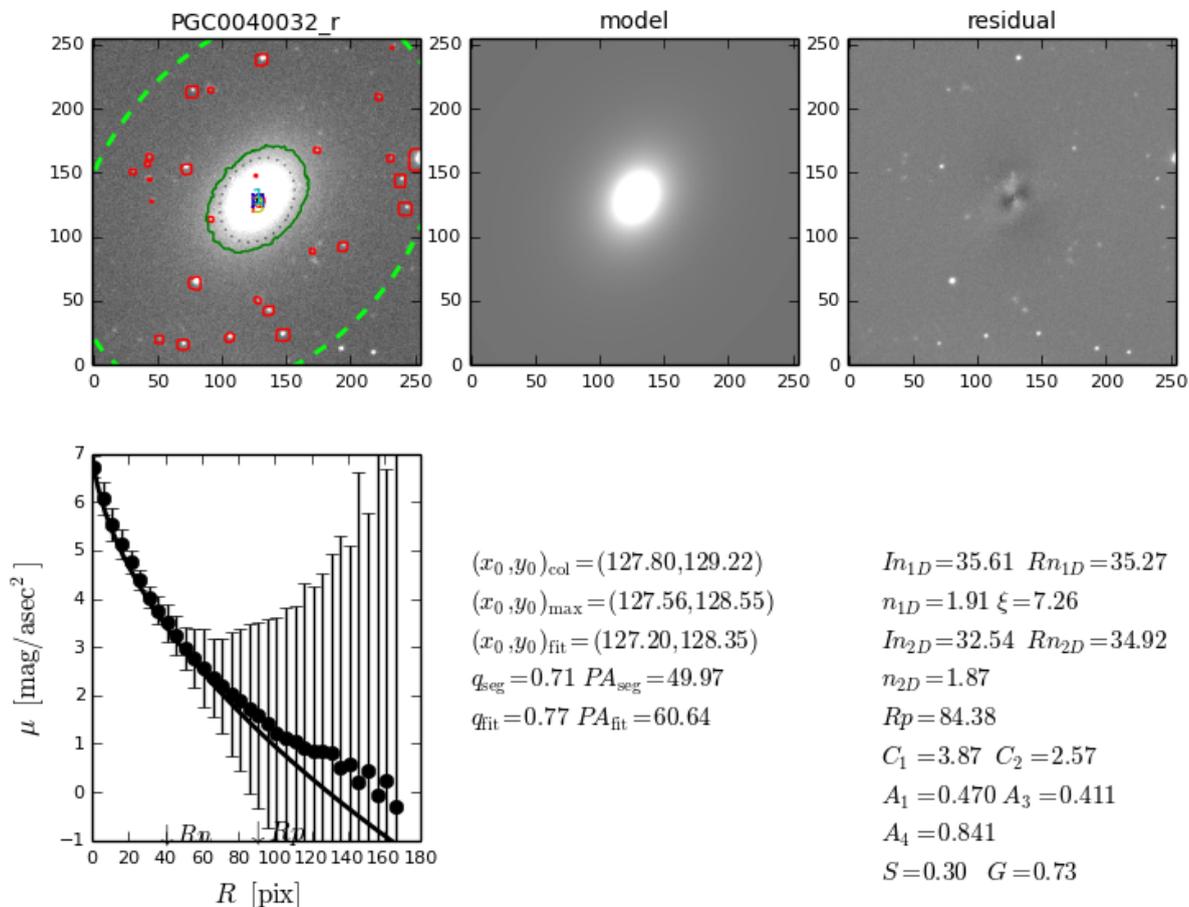


FIGURA 3.8: Exemplo de resultado do MORFOMETRYKA. Imagem original da galáxia PGC 40032 com estrelas mascaradas (superior esquerdo), modelo da galáxia ajustado (superior centro), resíduo produzido pela subtração da imagem original com o modelo (superior direito), perfil de brilho em função do raio (inferior esquerdo) e parâmetros medidos (inferior direito). Disponível em <<http://www.ferrari.pro.br/home/research/morphometry.php>>.

Capítulo 4

Resultados

The first principle is that you must not fool yourself and you are the easiest person to fool.

Richard Feynman

O processo de redshift artificial proposto na seção 3.3.3 é detalhado aqui junto com a apresentação dos resultados encontrados para os parâmetros morfométricos descritos na no capítulo 2. O processo foi aplicado para uma subamostra de 100 galáxias do catalogo EFIGI descrito em sua totalidade em (Baillard et al., 2011). A seleção da amostra é descrita, incluindo uma breve descrição das suas principais características. Na seção 4.4, os resultados encontrados são apresentados em gráficos de densidade e das médias das distribuições entre $\pm 1\sigma$ para cada parâmetro do estudo.

4.1 Catálogo EFIGI

O catalogo EFIGI conta com 4458 galáxias locais com sua morfologia bem descrita em (Baillard et al., 2011), reunindo dados de diversos levantamentos e bancos de dados, como o PGC (Principal Galaxy Catalogue), SDSS (Sloan Digital Sky Survey), Value-Added Galaxy Catalogue, HyperLeda e o NED (NASA Extragalactical Database). As imagens dos objetos estão disponíveis nos filtros u, g, r, i e z juntamente com as PSFs para cada imagem. Todo o catalogo possui uma morfologia bem descrita, o que faz ele ser interessante para o escopo do trabalho. Informação sobre o redshift de $\approx 99,5\%$ do

catalogo está disponível através do HyperLeda e do NED, sendo essa informação essencial para nossas simulações. Uma caracterização da distribuição de morfologias e do redshift do catalogo é representada na figura (4.1). As imagens disponíveis publicamente possuem uma resolução baixa, todas com 255x255 pixels, independente do redshift, o que dificulta o processo de redshift artificial do FERENGI até redshifts mais altos, principalmente em galáxias muito concentradas (índice de Sérsic alto) do que os utilizados. Mesmo com esse problema, conseguimos contar com o êxito nas simulações do FERENGI em 100 galáxias do EFIGI. Um estudo futuro com as imagens originais poderia ir até pelo menos $z \approx 1$, mais do que o dobro do intervalo utilizado no atual trabalho.

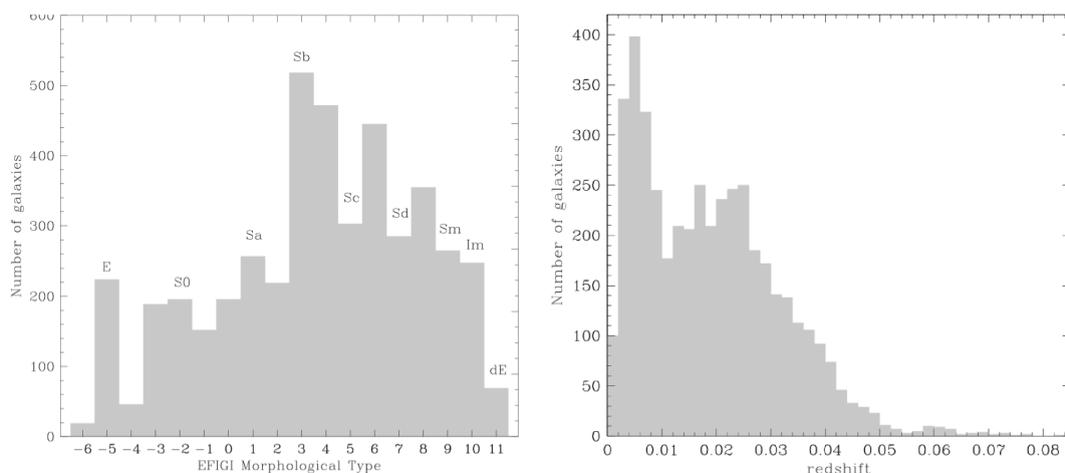


FIGURA 4.1: Representação da distribuição de morfologias (esquerda) e de redshifts (direita) do EFIGI, adaptado de [Baillard et al. \(2011\)](#). O catalogo apresenta uma predominância de galáxias espirais e irregulares sobre as elípticas e lenticulares. O pico de galáxias em $z \approx 0.004$ é devido ao aglomerado de Virgo, que faz parte do banco de dados.

4.2 Amostra

Para selecionar as 100 galáxias da amostra, 250 galáxias do EFIGI foram separadas, indo da PGC 212 até PGC 9822. As 28 simulações programadas para cada galáxia foram executadas, mas em algumas delas o FERENGI não conseguiu efetuar as simulações nos redshifts mais altos, parte por não conseguir resolver a galáxia na imagem, já que algumas eram pequenas demais após algumas simulações, principalmente as com índice de Sérsic alto. Com isso, todas as galáxias que não tiveram as 28 simulações efetuadas com sucesso foram descartadas, resultando em um grupo de 150 galáxias. O MORFOMETRYKA então foi executado para cada uma das imagens da simulação, mas algumas galáxias

estavam tão pequenas e obscurecidas por ruído que os parâmetros morfométricos não puderam ser medidos. Essas também foram descartadas, resultando em um grupo de 100 galáxias com todas as simulações do FERENGI e com os parâmetros morfométricos extraídos com o MORFOMETRYKA. No futuro, ao utilizar as imagens originais do próprio campo do SDSS, essas galáxias que foram descartadas poderão ser analisadas. Mesmo representando apenas cerca de 2% do catálogo EFIGI, as 28 simulações com o FERENGI para cada uma das galáxias totalizaram 2800 imagens para serem processadas pelo MORFOMETRYKA. Um trabalho completo com todo o EFIGI geraria mais de 120 mil imagens e fugiria do escopo do presente trabalho. Um mosaico com todas as galáxias para propósitos de inspeção é apresentado na figura (4.2).

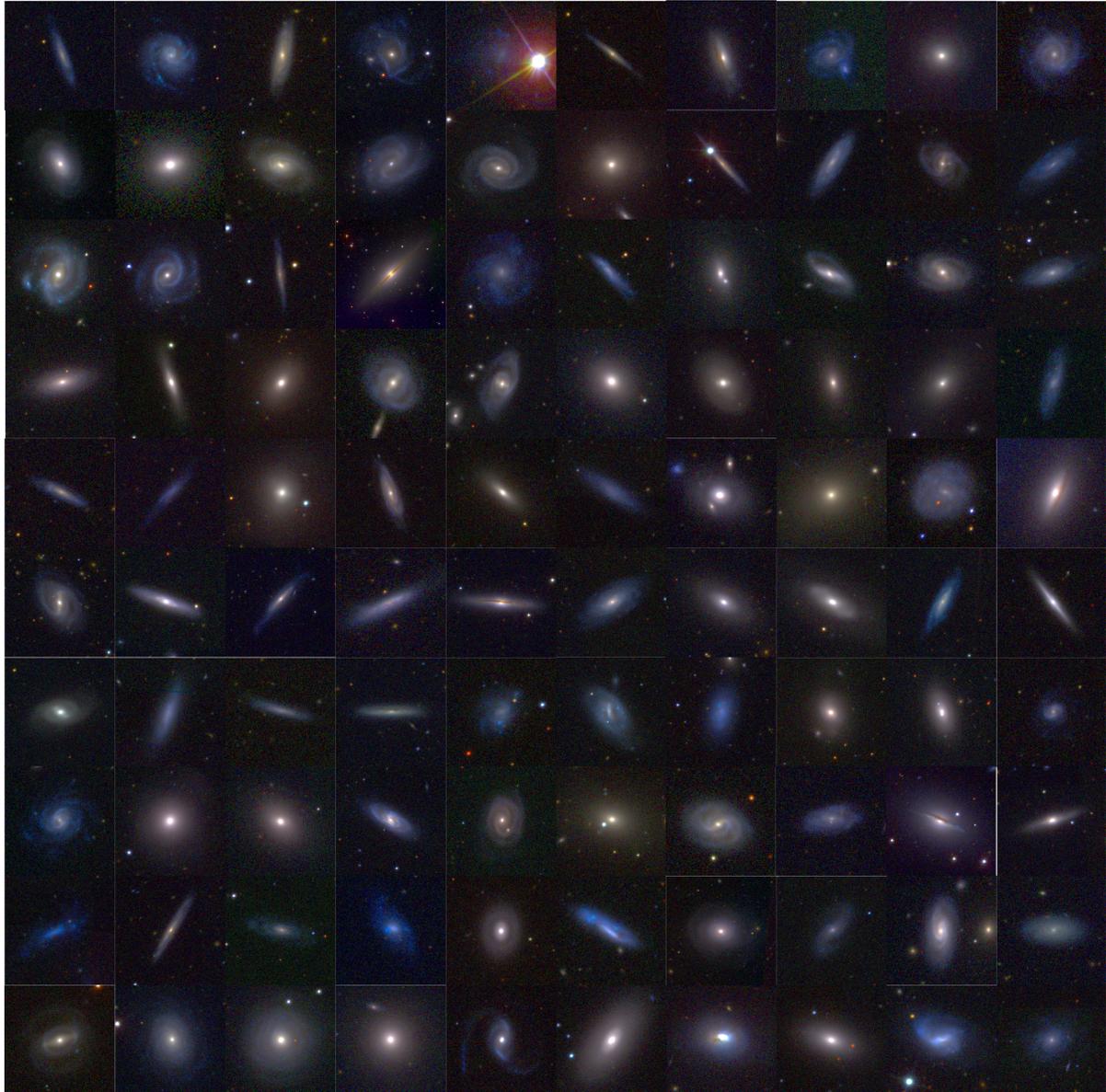


FIGURA 4.2: Mosaico representando as 100 galáxias da amostra utilizada no trabalho. Todas imagens coloridas estão disponíveis também junto com as imagens de cada filtro do EFIGI em <http://www.astromatic.net/projects/efigi>.

4.2.1 Características da amostra

Como o nosso banco de dados representa uma pequena parcela do catálogo todo, é necessário caracterizarmos essa subamostra, pois dificilmente apresentaria todas as mesmas categorias do EFIGI, sendo que isso se faz importante para identificar qualquer viés que a amostra possa provocar nos resultados. A distribuição de morfologias é demonstrada pelo histograma na figura 4.3. A distribuição de redshifts não apresenta o pico em $z \approx 0.004$

como o EFIGI, não possuindo diversas galáxias do aglomerado de Virgo, como mostra a figura 4.4. Por completeza, os índices de Sérsic e os raios efetivos R_n da amostra também foram usados para caracterizá-la, já que mostram um tendência evidente: há uma concentração de galáxias com índice de Sérsic baixo ($n < 4$) e uma grande parte da amostra possuindo raios efetivos entre $20 < R_n < 35$ pixels, conforme figura 4.5 e 4.6.

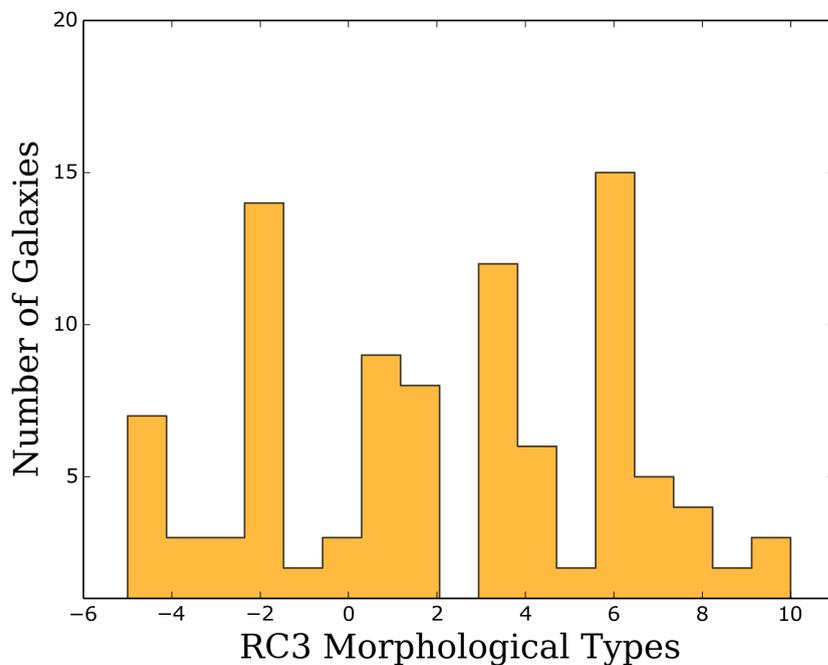


FIGURA 4.3: Distribuição da morfologia da subamostra utilizada. Não há uma predominância evidente de galáxias espirais como em todo catalogo EFIGI.

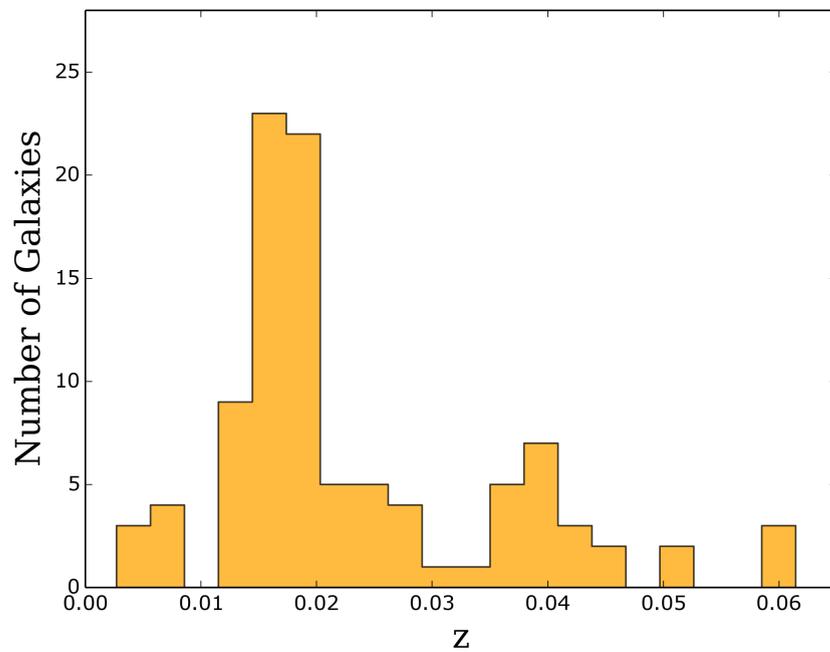


FIGURA 4.4: Distribuição do redshift da amostra.

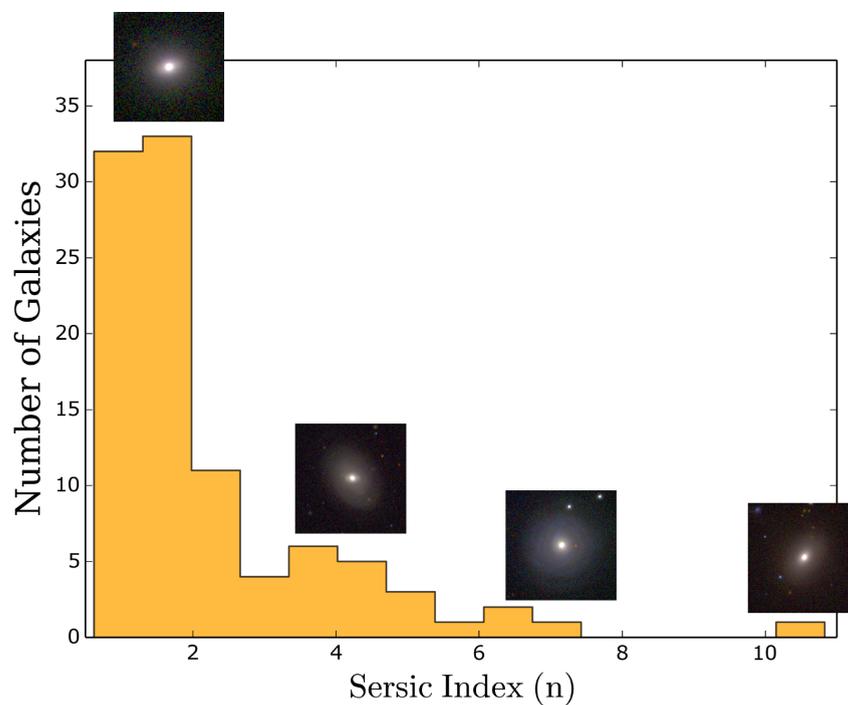


FIGURA 4.5: Distribuição do índice de Sérsic da amostra. A maioria das galáxias possui um índice de Sérsic baixo, sendo que apenas uma galáxia é muito concentrada, com $n > 10$.

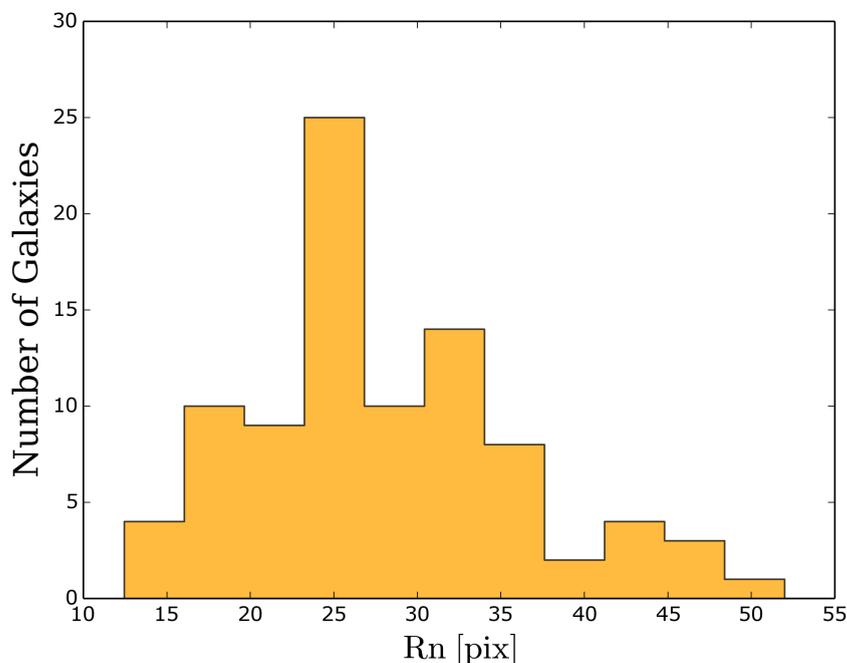


FIGURA 4.6: Distribuição dos raios efetivos da amostra. Há uma predominância de galáxias com $20 < Rn < 35$.

4.3 O Processo

O processo idealizado para abordar o problema consiste de quatro etapas principais e está exemplificado na figura 4.7. Primeiro, a amostra foi preparada conforme seção anterior. Um código *wrapper*¹ foi escrito para adaptar o FERENGI à realizar simulações simultâneas sem interação humana a fim de automatizar o processo, já que o algoritmo do FERENGI é extremamente lento e inviável de ser assistido para simulações em mais de uma galáxia². Todas as 28 imagens geradas pelo FERENGI para a galáxia PGC 3620 são mostradas na figura 4.8 para exemplificar. Com as imagens resultantes de todas as simulações, foi possível aplicar o MORFOMETRYKA em todas elas de maneira automatizada, sendo necessário apenas a redução dos dados após a tarefa. Todo esse esquema foi inicialmente testado em uma pequena amostra de 6 galáxias do catálogo FREI (Ferreira and Ferrari, 2013). Como todo o processo foi automatizado, a adaptação para um grande número de galáxias foi facilitada. Apenas a apresentação dos dados precisou ser alterada

¹Código que encapsula outro algoritmo para estender suas funcionalidades

²O tempo de execução para cada simulação varia entre 3 e 5 minutos com 4 cores de 3 Ghz, resultando em aproximadamente 2 horas para cada galáxia

a fim de ajudar a interpretação dos mesmos. Após a finalização do presente trabalho, ele poderá ser estendido para uma amostra maior do EFIGI ou de outro levantamento de maneira semelhante, servindo de ferramenta para trabalhos paralelos do grupo.

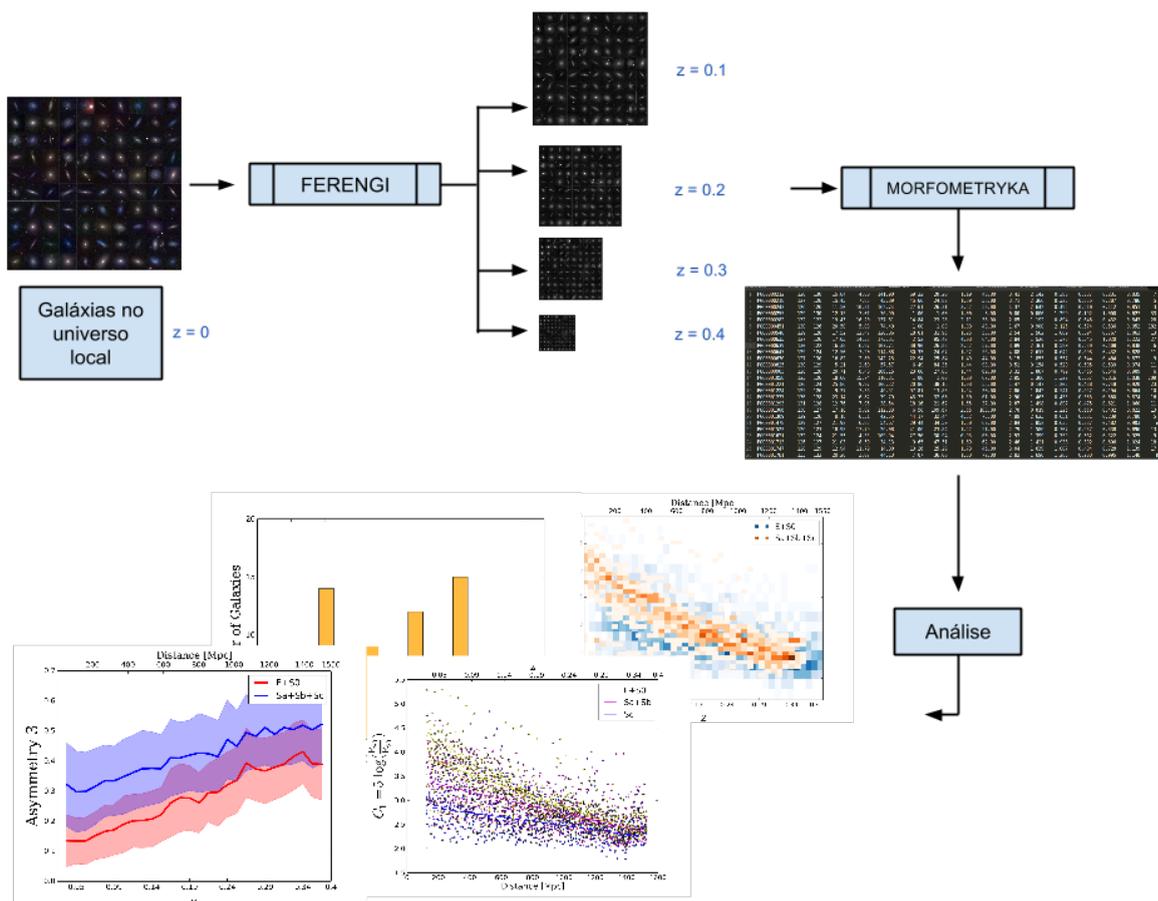


FIGURA 4.7: Diagrama do processo desenvolvido. Primeiro a amostra foi preparada e então o FERENGI é aplicado em cada uma das galáxias 28 vezes, uma para cada passo de 50 Mpc, indo de 150 Mpc até 1500 Mpc. Depois, o MORFOMETRYKA é aplicado para cada uma das 2800 imagens geradas, extraindo os parâmetros morfológicos de cada objeto em todos os redshifts simulados. Os dados são então reduzidos e apresentados em gráficos de densidade para análise.

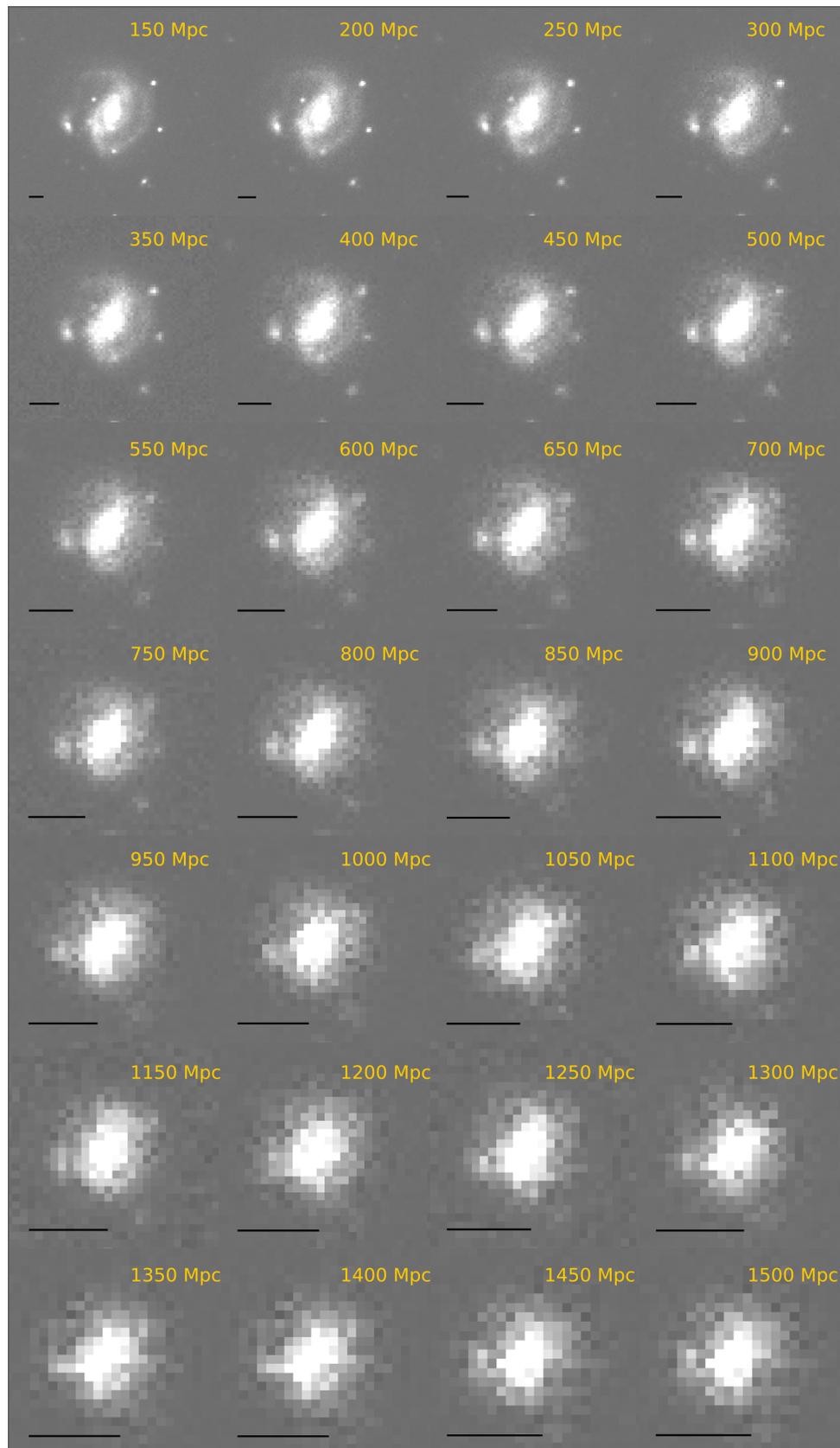


FIGURA 4.8: Mosaico com as 28 simulações para a galáxia **PGC 3620**. A escala apresentada nas imagens possui 10 pixels. As cores para a distribuição de brilho não estão em escala.

4.4 O comportamento dos parâmetros morfométricos com o redshift

Como mencionado, o comportamento dos parâmetros morfométricos para a amostra foram obtidos para um intervalo de 150 Mpc ($z \approx 0.05$) até 1500 Mpc ($z \approx 0.5$). Demos preferência para os parâmetros que não dependiam explicitamente da distância na análise, como o sistema **CASGM** e para o índice de Sérsic, sendo mais fácil interpretar o resultado e verificar o efeito que o redshift provoca neles. As galáxias da amostra foram divididas em dois grupos, **Elípticas e Lenticulares** ($-6 < T < 1$) e **Espirais e Irregulares** ($1 < T < 10$). Ambos foram criados pois o comportamento dos parâmetros era semelhante entre os tipos, nos dando a possibilidade de comparar também se algum deles é robusto o suficiente para separar o tipo morfológico com o redshift ou se a separação por tipos acaba sendo menos eficaz para redshifts altos. Gráficos de densidade são apresentados para os dois grupos ao lado de um gráfico com as respectivas médias das distribuições incluindo $\pm 1\sigma$ para os parâmetros de assimetria $A1$ e $A3$, concentrações $C28$ e $C59$, coeficiente de Gini, suavidade $S1$ e $S3$, M_{20} e para o índice de Sérsic seguindo com uma breve discussão dos resultados.

4.4.1 Assimetrias

As assimetrias $A1$ e $A3$ são apresentadas na figura 4.9. É possível perceber que em ambos os casos, a assimetria da distribuição dos dois grupos aumenta com o redshift. As imagens de duas galáxias em três etapas da simulação são apresentadas na figura 4.10, facilitando a interpretação do efeito: as galáxias originais não são totalmente simétricas e a diminuição da resolução e do sinal/ruído acaba aumentando a medida de assimetria. Galáxias muito assimétricas devem ter suas assimetrias suavizadas com o redshift, e um estudo com uma amostra só com irregulares e peculiares poderá mostrar esse comportamento. Apesar dos dois parâmetros mostrarem o mesmo comportamento, a assimetria $A3$, que é medida com o índice de correlação de Spearman, é mais estável com o redshift do que $A1$.

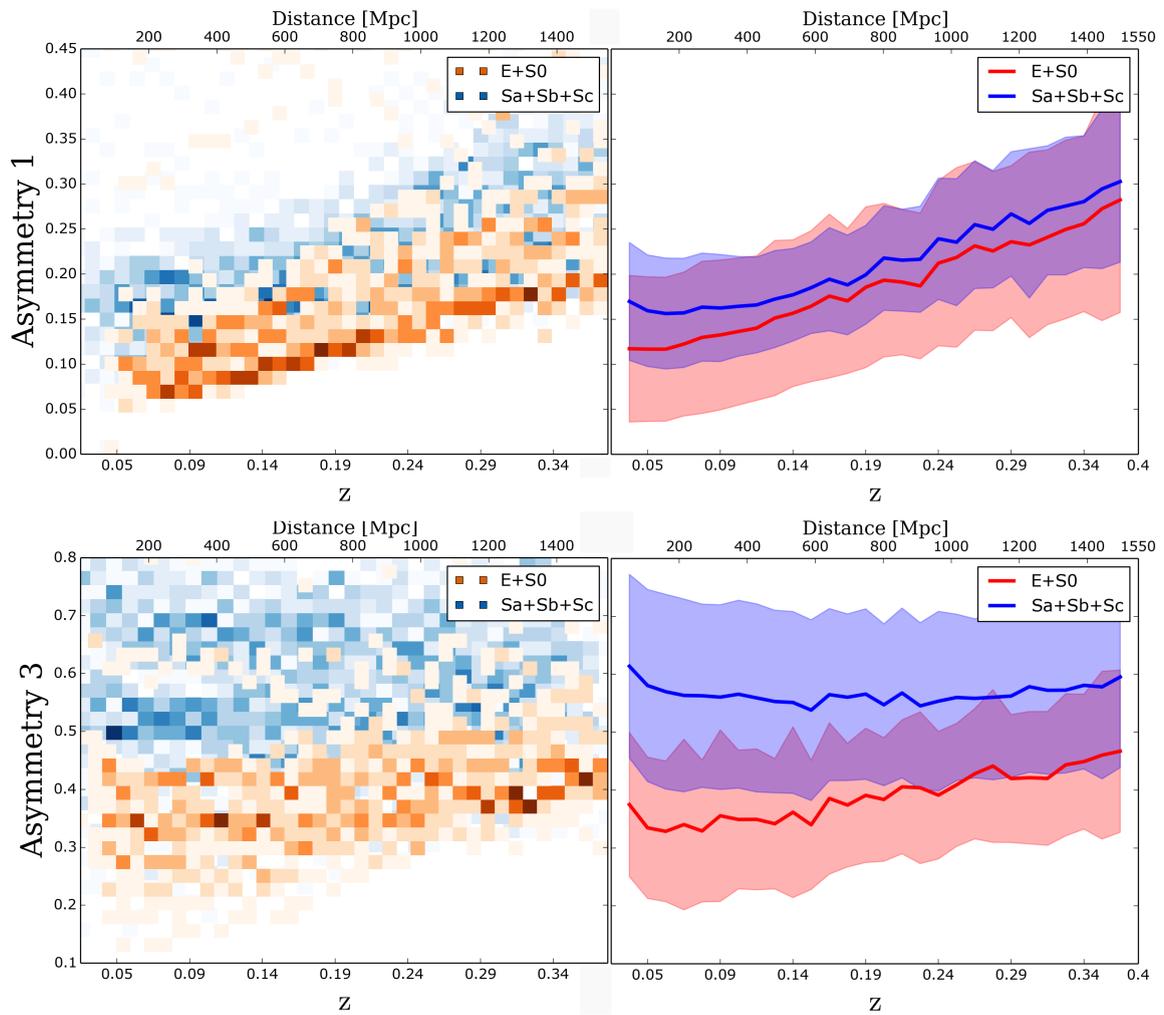


FIGURA 4.9: Gráfico da densidade de A_1 e A_3 com o redshift das distribuições de ambos os grupos (esquerda) e gráfico das médias entre $+1 \sigma$ e -1σ para cada grupo (direita).

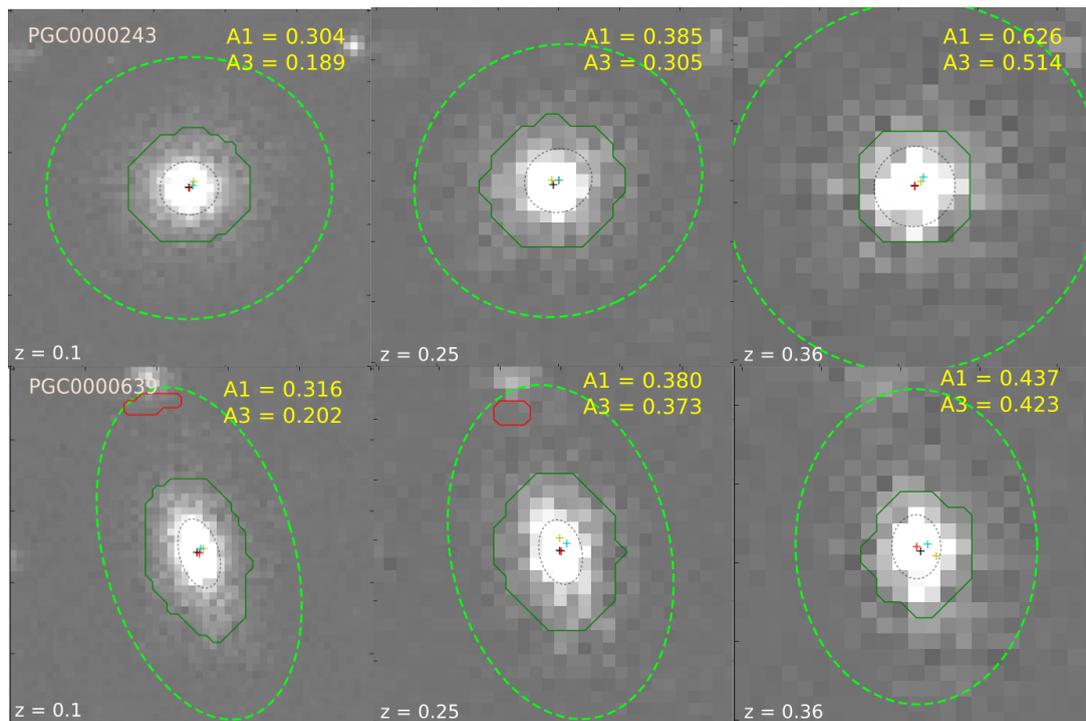


FIGURA 4.10: Imagens de 3 etapas da simulação do redshift artificial ($z = 0.1$, $z = 0.25$ e $z = 0.36$) para a galáxia **S0** PGC 243 (superior) e para a galáxia **Sa** PGC 639 (inferior). As assimetrias $A1$ e $A3$ são apresentadas em amarelo para cada imagem.

4.4.2 Concentrações

As concentrações C_{28} e C_{59} são apresentadas na figura 4.11. Ambos parâmetros decrescem, assim como esperado, já que a concentração da luz na galáxia é suavizada com a diminuição da resolução e com o efeito da PSF. Outra característica interessante encontrada é que, para os dois grupos apresentados, fica mais difícil diferenciá-los em redshifts mais altos do que no universo local. A concentração dos grupos converge para o mesmo ponto, o que não pode ser observado de forma tão clara nas assimetrias. Isso sugere que os parâmetros de concentração são menos confiáveis para distinções morfológicas em redshifts mais altos e são bastante afetados pela PSF.

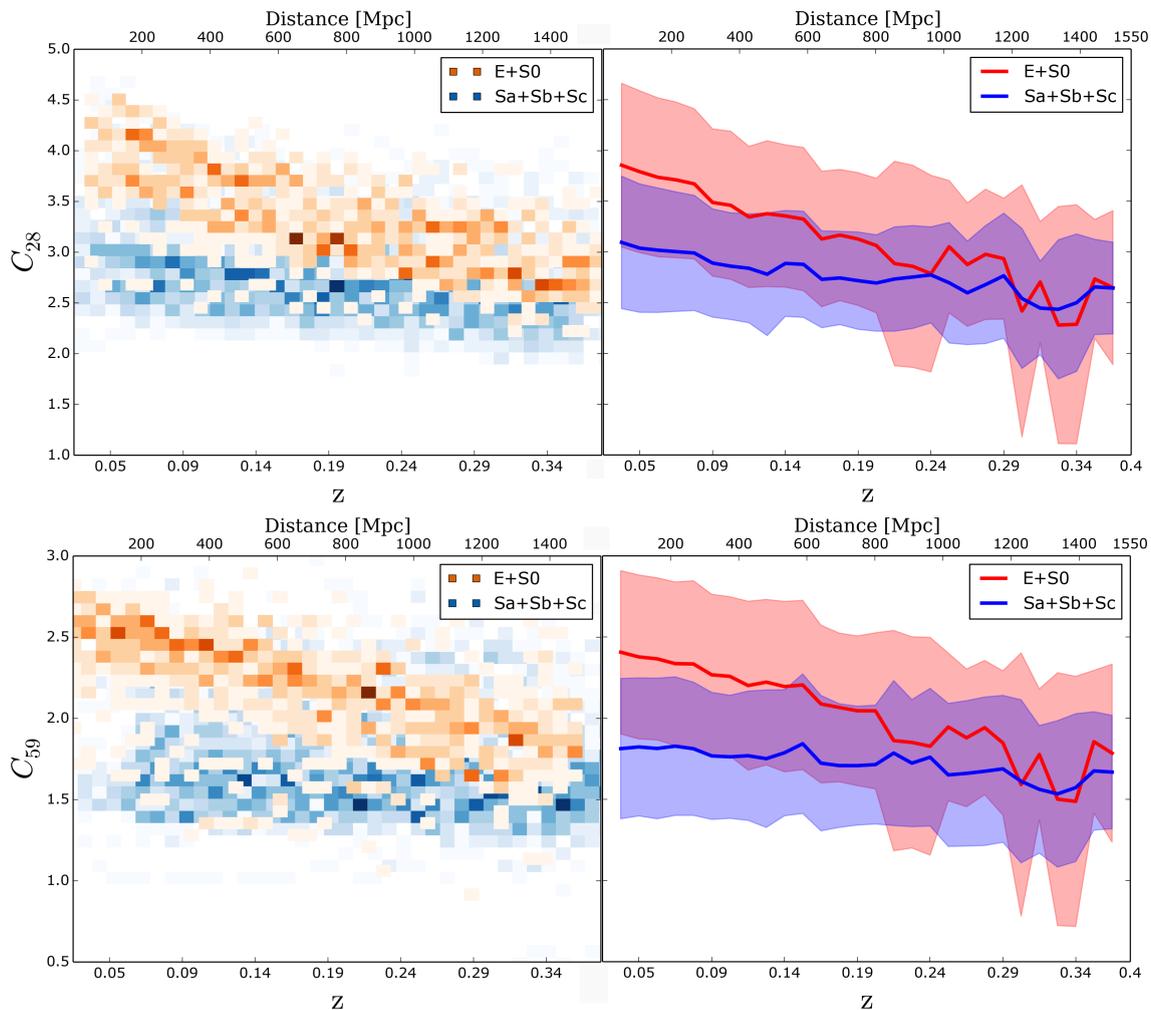


FIGURA 4.11: Gráfico de densidade das concentrações C_{28} e C_{59} para os dois grupos (esquerda) e gráfico das médias dos mesmos parâmetros entre $+1 \sigma$ e -1σ para cada grupo (direita).

4.4.3 Coeficiente de Gini

O coeficiente de Gini é apresentado na figura 4.12 e é um dos parâmetros mais estáveis dos utilizados no trabalho. Seu aumento é esperado já que essa medida está diretamente relacionada com a amostragem da imagem, conforme a galáxia é degradada pela simulação, menos pixels são utilizados para representar a distribuição de luminosidade. A diferença entre as médias das distribuições permanece igual durante o intervalo do redshift utilizado, ou seja, não há grupo mais afetado pelo efeitos adversos, mas esse não é um parâmetro interessante para a separação morfológica.

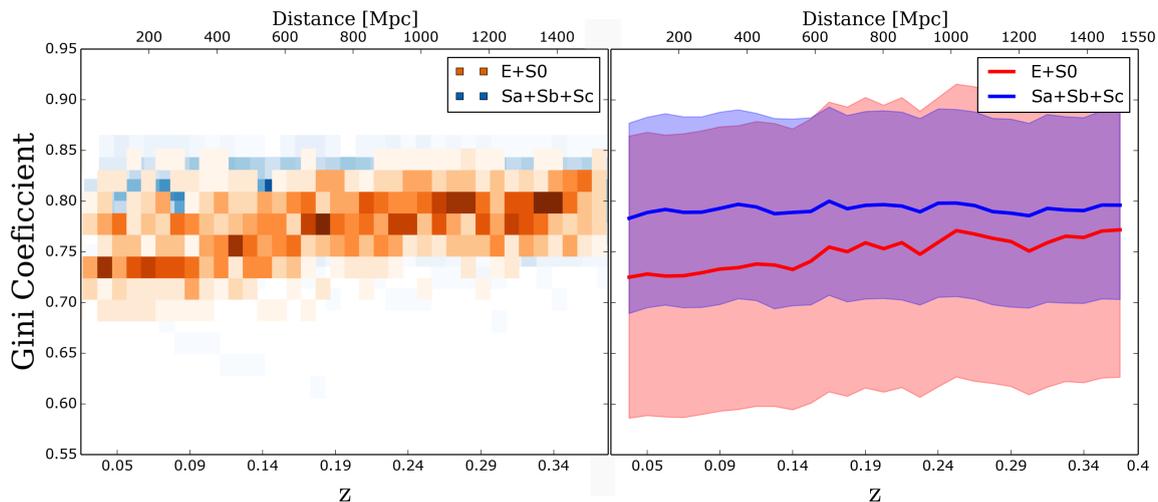


FIGURA 4.12: Gráfico da densidade do coeficiente de Gini para ambos os grupos (esquerda) e gráfico das médias entre $+1 \sigma$ e -1σ para cada grupo (direita).

4.4.4 Índice de Sérsic

As distribuições para o índice de Sérsic são mostradas na figura 4.13. Mesmo sendo um parâmetro que descreve a concentração do perfil de brilho, se mostrou estável com o redshift comparado com os índices de concentração. Mesmo assim, as grandes variações nos desvios padrões das distribuições dos grupos mostram que esse parâmetro é muito sensível à amostragem da imagem e deve ser medido com grande cautela. Como a amostra conta com poucas galáxias com n grande, é aconselhável demonstrar esse mesmo comportamento para uma amostra com um número grande de galáxias com essa concentração, excluindo um viés estatístico. Isso poderá ser feito com imagens do campo do SDSS em um trabalho futuro.

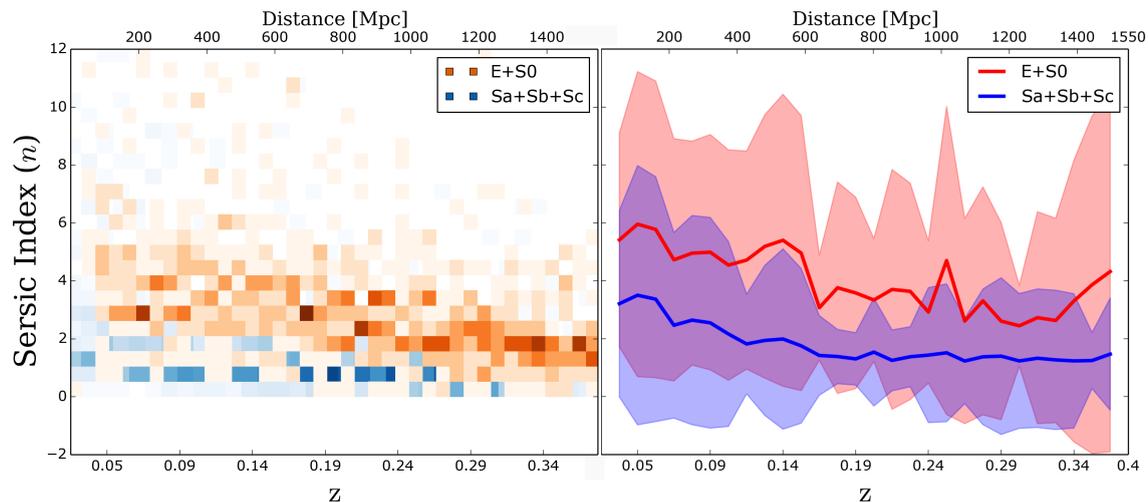


FIGURA 4.13: Gráfico da densidade do $\log(n)$ de ambos os grupos (esquerda) e das médias entre $+1 \sigma$ e -1σ para cada grupo (direita).

4.4.5 Suavidades

As suavidades S_1 e S_3 são apresentadas na figura 4.14. É possível perceber que em ambos os casos, a suavidade da distribuição dos dois grupos diminui com o redshift. Isso é esperado pois galáxias com um alto índice de suavidade são galáxias com pequenas estruturas. Com o aumento do redshift, as galáxias ficam menos resolvidas e essas estruturas acabam sumindo, parte pelo efeito da PSF e parte pela diminuição da resolução. Apesar disso, o índice S_1 mostra uma característica notável no gráfico de densidade: o parâmetro S_1 decresce até certo limite por volta de $z \approx 0.1$ e depois volta a crescer. Isso acontece pois esse parâmetro é muito sensível à PSF da imagem. A galáxia acaba ficando do tamanho da PSF e tudo o que conseguimos medir através de S_1 é as propriedades da PSF junto com o ruído da imagem. O parâmetro S_3 , que é medido com o índice de correlação de Spearman, não apresenta tal comportamento e sugere ser mais adequado para medidas em altos redshifts.

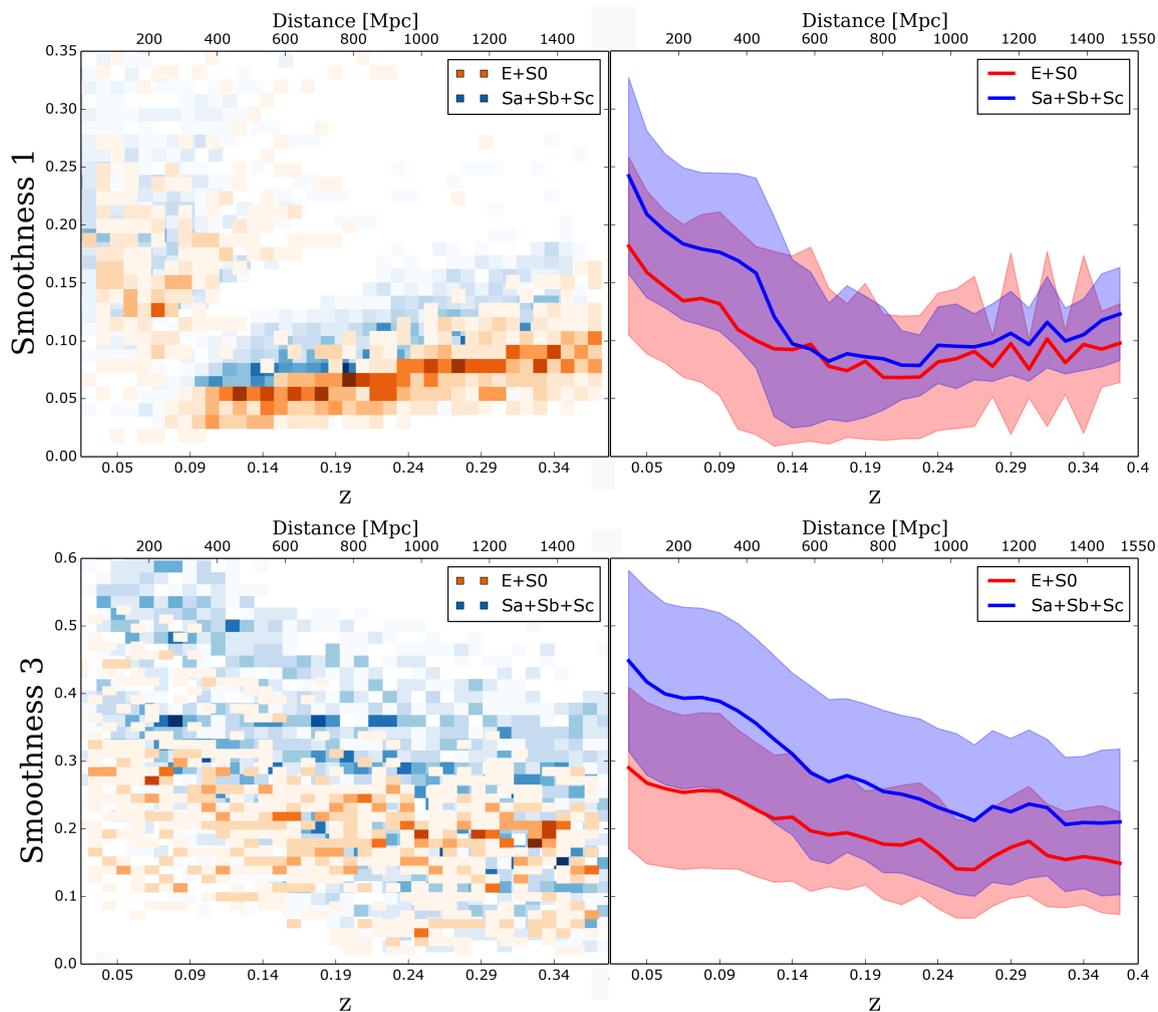


FIGURA 4.14: Gráfico da densidade de S_1 e S_3 com o redshift das distribuições de ambos os grupos (esquerda) e gráfico das médias entre $+1 \sigma$ e -1σ para cada grupo (direita).

4.4.6 M_{20}

O comportamento do momento de brilho M_{20} é apresentado na figura ?? . O parâmetro converge para valores de M_{20} da PSF, o que é esperado. Como é uma medida logarítmica, deveria diminuir em módulo com a diminuição da resolução da imagem, e grande parte da concentração do objeto em altos redshifts é devido ao efeito da PSF (as galáxias acabam se tornando do tamanho das respectivas PSFs).

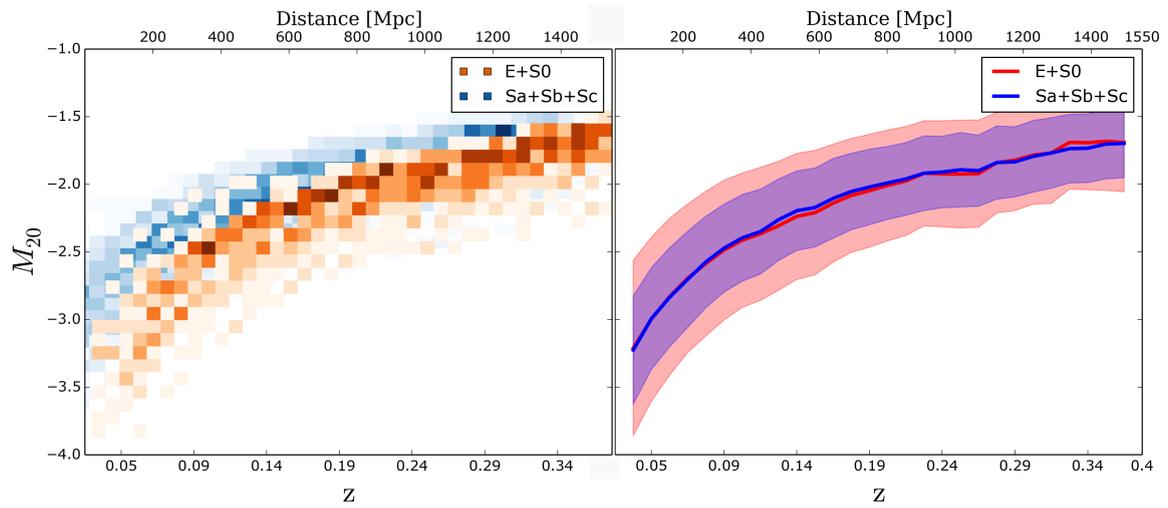


FIGURA 4.15: Gráfico da densidade de M_{20} com o redshift das distribuições de ambos os grupos (esquerda) e gráfico das médias entre $+1\sigma$ e -1σ para cada grupo (direita).

Capítulo 5

Conclusão

I may not have gone where I intended to go, but I think I have ended up where I intended to be.

Douglas Adams

Através do modelo cosmológico padrão é possível medir distâncias em escalas cosmológicas, o que permite que galáxias locais possam ser simuladas como se estivessem em distâncias variadas. Dessa forma, como a morfologia de galáxias locais é bem conhecida, o atual trabalho conseguiu comparar o resultado dessas simulações com os parâmetros morfométricos originais. Uma amostra de 100 galáxias do catalogo EFIGI foi preparada para o estudo, sendo que para cada galáxia, 28 simulações de redshift artificial foram planejadas. Uma simulação para cada passo de 50 Mpc entre 150 Mpc e 1500 Mpc, gerando 2800 imagens para toda a amostra. Para medir as Assimetrias, Suavidades, Concentrações, M_{20} e Índice de Sérsic, o pacote MORFOMETRYKA (Ferrari et al., 2015) foi utilizado, reduzindo todos os dados de forma automatizada. Uma separação por grupo morfológico foi então efetuada, dividindo a amostra em galáxias Elípticas e Lenticulares e galáxias **Espirais e Irregulares**. Os resultados para cada parâmetro mostram que essas medidas são, na maioria dos casos, sensíveis aos efeitos cosmológicos e instrumentais descritos. As Assimetrias tendem a aumentar com o redshift, as concentrações decaem rapidamente com o redshift e a suavidade S_1 decresce até certo limite e depois volta a crescer. Além de mostrar a tendencia dessas medidas morfométricas com a distancia, o trabalho também nos mostra que para as assimetrias e suavidades, os parâmetros medidos com o índice de correlação de Spearman são mais estáveis com o redshift do que suas suas

contrapartes usuais. Todas as medidas morfométricas devem ser efetuadas com grande cuidado em galáxias em altos redshifts, onde a resolução e o sinal ruído são baixos. Os efeitos descritos podem provocar facilmente um viés nas medidas caso cuidado adequado não seja tomado. O processo criado é automatizado e pode ser facilmente estendido para uma amostra ainda maior no futuro, podendo incluir todas as 4458 galáxias do catálogo EFIGI. O processo apresentado nesse trabalho foi reportado em [Ferreira and Ferrari \(2013, 2014\)](#).

Bibliografia

- V. M. Slipher. Spectrographic Observations of Nebulae. *Popular Astronomy*, 23:21–24, January 1915.
- V. M. Slipher. Nebulae. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 56:403–409, 1917.
- E. P. Hubble. *Realm of the Nebulae*. 1936.
- M. Barden, K. Jahnke, and B. Häußler. FERENGI: Redshifting Galaxies from SDSS to GEMS, STAGES, and COSMOS. *apjs*, 175:105–115, March 2008. doi: 10.1086/524039.
- A. Baillard, E. Bertin, V. de Lapparent, P. Fouqué, S. Arnouts, Y. Mellier, R. Pelló, J.-F. Leborgne, P. Prugniel, D. Makarov, L. Makarova, H. J. McCracken, A. Bijaoui, and L. Tasca. The EFIGI catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology. *aap*, 532:A74, August 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201016423.
- E. R. Harrison. *Cosmology: The Science of the Universe*. Project Gutenberg.
- Dante, A. The vision of paradise, complete. ebook, <http://www.gutenberg.org>, 6 2004.
- E. R. Harrison. The Dark Night Sky Riddle - Olber's Paradox. In S. Bowyer and C. Leinert, editors, *The Galactic and Extragalactic Background Radiation*, volume 139 of *IAU Symposium*, page 3, 1990.
- Barbara Ryden. *Introduction to Cosmology*. Addison-Wesley, 1 edition, 200.
- G. Lemaître. Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, 47:49–59, 1927.
- G. Lemaître. Expansion of the universe, A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae. *mnras*, 91:483–490, March 1931.

- H. S. Leavitt. 1777 variables in the Magellanic Clouds. *Annals of Harvard College Observatory*, 60:87–108, 1908.
- H. S. Leavitt and E. C. Pickering. Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, 173:1–3, March 1912.
- E. P. Hubble. Extragalactic nebulae. *apj*, 64:321–369, December 1926. doi: 10.1086/143018.
- E. Hubble. A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Proceedings of the National Academy of Science*, 15:168–173, March 1929. doi: 10.1073/pnas.15.3.168.
- G. Gamow. Expanding Universe and the Origin of Elements. *Physical Review*, 70:572–573, October 1946. doi: 10.1103/PhysRev.70.572.2.
- R. A. Alpher and R. Herman. Evolution of the Universe. *Nature*, 162:774–775, November 1948. doi: 10.1038/162774b0.
- A. A. Penzias and R. W. Wilson. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *ApJ*, 142:419–421, July 1965. doi: 10.1086/148307.
- J. C. Mather, E. S. Cheng, R. E. Eplee, Jr., R. B. Isaacman, S. S. Meyer, R. A. Shafer, R. Weiss, E. L. Wright, C. L. Bennett, N. W. Boggess, E. Dwek, S. Gulkis, M. G. Hauser, M. Janssen, T. Kelsall, P. M. Lubin, S. H. Moseley, Jr., T. L. Murdock, R. F. Silverberg, G. F. Smoot, and D. T. Wilkinson. A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite. *apjl*, 354:L37–L40, May 1990. doi: 10.1086/185717.
- F. Zwicky. On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *apj*, 86:217, October 1937. doi: 10.1086/143864.
- V. C. Rubin and W. K. Ford, Jr. Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. *apj*, 159:379, February 1970. doi: 10.1086/150317.
- J. P. Ostriker, P. J. E. Peebles, and A. Yahil. The size and mass of galaxies, and the mass of the universe. *apjl*, 193:L1–L4, October 1974. doi: 10.1086/181617.
- J. Einasto, A. Kaasik, and E. Saar. Dynamic evidence on massive coronas of galaxies. *nat*, 250:309–310, July 1974. doi: 10.1038/250309a0.

- W. G. Mathews. The enormous mass of the elliptical galaxy M87 - A model for the extended X-ray source. *apj*, 219:413–423, January 1978. doi: 10.1086/155794.
- J. R. Primack. Dark Matter and Galaxy Formation. In F. Roig, D. Lopes, R. de La Reza, and V. Ortega, editors, *American Institute of Physics Conference Series*, volume 1192 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 101–137, December 2009. doi: 10.1063/1.3274198.
- A. G. Doroshkevich, M. I. Khlopov, R. A. Sunyaev, A. S. Szalay, and I. B. Zeldovich. Cosmological impact of the neutrino rest mass. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 375:32–42, December 1981. doi: 10.1111/j.1749-6632.1981.tb33688.x.
- I. B. Zeldovich, J. Einasto, and S. F. Shandarin. Giant voids in the universe. *nat*, 300:407–413, December 1982. doi: 10.1038/300407a0.
- S. D. M. White, C. S. Frenk, and M. Davis. Clustering in a neutrino-dominated universe. *apjl*, 274:L1–L5, November 1983. doi: 10.1086/184139.
- G. R. Blumenthal, H. Pagels, and J. R. Primack. Galaxy formation by dissipationless particles heavier than neutrinos. *nat*, 299:37, September 1982. doi: 10.1038/299037a0.
- P. J. E. Peebles. Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations. *apjl*, 263:L1–L5, December 1982. doi: 10.1086/183911.
- M. S. Turner, G. Steigman, and L. M. Krauss. Flatness of the universe - Reconciling theoretical prejudices with observational data. *Physical Review Letters*, 52:2090–2093, June 1984. doi: 10.1103/PhysRevLett.52.2090.
- A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis, A. Clocchiatti, A. Diercks, P. M. Garnavich, R. L. Gilliland, C. J. Hogan, S. Jha, R. P. Kirshner, B. Leibundgut, M. M. Phillips, D. Reiss, B. P. Schmidt, R. A. Schommer, R. C. Smith, J. Spyromilio, C. Stubbs, N. B. Suntzeff, and J. Tonry. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *aj*, 116:1009–1038, September 1998. doi: 10.1086/300499.
- S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, P. G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, A. Goobar, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, J. C. Lee, N. J. Nunes, R. Pain, C. R. Pennypacker, R. Quimby, C. Lidman, R. S. Ellis, M. Irwin, R. G. McMahon, P. Ruiz-Lapuente, N. Walton, B. Schaefer, B. J. Boyle, A. V. Filippenko, T. Matheson, A. S. Fruchter, N. Panagia, H. J. M. Newberg, W. J. Couch, and

- T. S. C. Project. Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae. *apj*, 517:565–586, June 1999. doi: 10.1086/307221.
- D. W. Hogg. Distance measures in cosmology. *ArXiv Astrophysics e-prints*, May 1999.
- E. Opik. An estimate of the distance of the Andromeda Nebula. *ApJ*, 55:406–410, June 1922. doi: 10.1086/142680.
- S. van den Bergh, R. G. Abraham, R. S. Ellis, N. R. Tanvir, B. X. Santiago, and K. G. Glazebrook. A Morphological Catalog of Galaxies in the Hubble deep Field. *aj*, 112:359, August 1996. doi: 10.1086/118020.
- R. G. Abraham, S. van den Bergh, K. Glazebrook, R. S. Ellis, B. X. Santiago, P. Surma, and R. E. Griffiths. The Morphologies of Distant Galaxies. II. Classifications from the Hubble Space Telescope Medium Deep Survey. 107:1, November 1996. doi: 10.1086/192352.
- R. G. Abraham and S. van den Bergh. The Morphological Evolution of Galaxies. *Science*, 293:1273–1278, August 2001. doi: 10.1126/science.1060855.
- G. Vaucouleurs. Classification and Morphology of External Galaxies. *Handbuch der Physik*, 53:275–310, 1959. doi: 10.1007/978-3-642-45932-0_7.
- G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, Jr., R. J. Buta, G. Paturel, and P. Fouqué. *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h. Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h*. 1991.
- A. N. Straughn, S. H. Cohen, R. E. Ryan, N. P. Hathi, R. A. Windhorst, and R. A. Jansen. Tracing Galaxy Assembly: Tadpole Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field. *apj*, 639:724–730, March 2006. doi: 10.1086/499576.
- G. de Vaucouleurs. Recherches sur les Nebuleuses Extragalactiques. *Annales d’Astrophysique*, 11:247, January 1948.
- J. L. Sérsic. Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 6:41, 1963.
- C. Y. Peng, L. C. Ho, C. D. Impey, and H.-W. Rix. Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images. *Aj*, 124:266–293, July 2002. doi: 10.1086/340952.

- L. Simard. GIM2D: Galaxy IMage 2D. Astrophysics Source Code Library, April 2010.
- C. J. Conselice. The Relationship between Stellar Light Distributions of Galaxies and Their Formation Histories. *Apjs*, 147:1–28, July 2003. doi: 10.1086/375001.
- R. G. Abraham, S. van den Bergh, and P. Nair. A New Approach to Galaxy Morphology. I. Analysis of the Sloan Digital Sky Survey Early Data Release. *ApJ*, 588:218–229, May 2003. doi: 10.1086/373919.
- J. M. Lotz, J. Primack, and P. Madau. A New Nonparametric Approach to Galaxy Morphological Classification. *Aj*, 128:163–182, July 2004. doi: 10.1086/421849.
- C. J. Conselice. The Evolution of Galaxy Structure Over Cosmic Time. *Araa*, 52:291–337, August 2014. doi: 10.1146/annurev-astro-081913-040037.
- J. Cougo and F. Ferrari. *Morfometria de Galáxias: Assimetria*. 2013.
- M. Cropper, R. Cole, A. James, Y. Mellier, J. Martignac, A.-M. Di Giorgio, S. Paltani, L. Genolet, J.-J. Fourmond, C. Cara, J. Amiaux, P. Guttridge, D. Walton, P. Thomas, K. Rees, P. Pool, J. Endicott, A. Holland, J. Gow, N. Murray, L. Duvet, J.-L. Augueres, R. Laureijs, P. Gondoin, T. Kitching, R. Massey, and H. Hoekstra. VIS: the visible imager for Euclid. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 8442 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 0, September 2012. doi: 10.1117/12.927241.
- F. Ferrari et al. Morfometryka: Galaxy morphometry. In preparation, see <http://www.ferrari.pro.br/home/research/morphometry.php>, 2015.
- L. Ferreira and F. Ferrari. On the stability of morphological parameters measurements with redshift. In *Deconstructing Galaxies: Structure and Morphology in the Era of Large Surveys, Santiago - Chile*, November 2013. Poster.
- L. Ferreira and F. Ferrari. On the stability of morphological parameters measurements with redshift. In *XXXVIII Reunião anual da Sociedade Astronômica Brasileira, Búzios - RJ*, 2014. Poster.