

CADERNOS DE ASTRONOMIA

NÚCLEO DE ASTROFÍSICA E COSMOLOGIA DA UFES

GALÁXIAS

MATERIALISMO OU IDEALISMO? UM OLHAR DESDE AS CIÊNCIAS

Até que ponto a mente é
responsável pela realidade física?

LENTEIS GRAVITACIONAIS DE BAIXO CUSTO

Analogias de observações
astronômicas na sala de aula
do ensino médio

ASTROFOTOGRAFIA EM DETALHES

As manchas solares, ocultação
de marte pela Lua e o nosso
satélite natural em destaque



CORPO EDITORIAL

Prof. Dr. Felipe Tovar Falciano (CBPF)
ftovar@cbpf.br

Prof. Dr. Hermano Velten (UFOP)
hermano.velten@ufop.edu.br

Prof. Dr. Júlio C. Fabris (Ufes)
julio.fabris@cosmo.ufes.org

Prof. Dr. Júnior Diniz Toniato (Ufes)
junior.toniato@ufes.br

CONSELHO CIENTÍFICO

Prof Dr. Adriano Mesquita Oliveira (Ifes)
adriano.oliveira@ifes.edu.br

Prof. Dr. José A. F. Pacheco (OCA, França)
pacheco@oca.eu

Prof. Dr. Sergio Mascarello Bisch (Ufes)
sergiobisch@gmail.com

DESIGN E LAYOUT

Carolina Luzes Marcos (Ufes)
carolina.marcos@edu.ufes.br

Thalita Sartori Beninca (Ufes)
thalita.beninca@edu.ufes.br

Vitor Petri Silva (Ufes)
vitor.p.silva@edu.ufes.br

ENDERECO

Núcleo de Astrofísica e Cosmologia.
Universidade Federal do Espírito Santo.
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras.
Vitória - ES. CEP 29075-010

E-mail: cadernos@cosmo-ufes.org

SOBRE A REVISTA

A revista Cadernos de Astronomia é uma publicação semestral do Núcleo Cosmo-Ufes da Universidade Federal do Espírito Santo e que conta também com recursos humanos do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e da Universidade Federal de Ouro Preto (vide o Corpo Editorial).

Propõe-se a publicar artigos destinados à divulgação científica, história da ciência, ensino e pesquisa em astronomia e áreas correlatas. O objetivo é tornar acessível a um amplo público, que inclui estudantes secundários, graduandos e simpatizantes da área, o conhecimento científico relacionado à astronomia, cosmologia e gravitação.

Possuindo acesso totalmente gratuito, cada número dedica uma seção inteira a um tema específico, onde especialistas nacionais e internacionais discutem em detalhes aspectos qualitativos e quantitativos do tópico em questão.

SUBMISSÕES

A revista Cadernos de Astronomia aceita artigos inéditos versando sobre temas de divulgação científica, história da ciência, ensino e pesquisa nas áreas de astronomia, cosmologia e disciplinas afins. Além de artigos que busquem traduzir para uma linguagem simples tópicos avançados de ciências, também se aceita a submissão de textos que introduzem aspectos técnicos de temas variados visando estudantes de graduação e início de pós-graduação. Espera-se assim contribuir para a ampliação de uma bibliografia qualificada para a formação de jovens cientistas.

Para mais informações acesse:

<https://periodicos.ufes.br/astronomia/about/submissions>

ARTE DE FUNDO DA CAPA E CONTRACAPA

Créditos: NASA, ESA, CSA, STScI, Janice Lee (STScI), Thomas Williams (Oxford), PHANGS Team

Disponível em:

<https://webbtelescope.org/contents/media/images/2024/105/01HMA6P3V363GW0EA0347CR6HV?news=true>



Carta ao Leitor

Esse número dos *Cadernos de Astronomia* aborda, em especial, o tema galáxias em seus diversos aspectos. A confirmação observacional de que o universo em grandes escalas é constituído de galáxias emergiu apenas há praticamente 100 anos atrás. Até o início do século XX, as observações permitiam unicamente deduzir que formávamos parte de um grande sistema estelar. Se conheciam, além das estrelas, algumas formações conhecidas como nebulosas, cuja natureza era ainda ignorada. Com o progresso das técnicas observacionais, o surgimento da espectrografia aplicada à astronomia, a melhoria das técnicas fotométricas, e a construção de telescópios cada vez mais potentes, pôde-se perceber que algumas nebulosas eram aglomerados estelares, outras grandes regiões de gases, algumas formando berçários de estrelas, entre outras estruturas. Mas, algumas nebulosas possuíam uma forma aparentemente espiral, e sua natureza era objeto de intensa discussão, consubstanciada no chamado Grande Debate, envolvendo dois dos principais astrônomos americanos da época, Heber Curtis e Harlow Shapley. Neste debate procurava-se definir se estas nebulosas espirais faziam parte do nosso sistema estelar, ou se eram outras estruturas semelhantes à que contém o Sol, mas muito mais distantes. O uso de novas técnicas de estimativas de distâncias, em especial através das estrelas variáveis do tipo cefeidas, revelou que estas nebulosas espirais eram outros imensos sistemas estelares, similares ao nosso, outros universos-ilhas, para usar a terminologia atribuída ao filósofo Immanuel Kant que, por volta de 1750 foi um dos primeiros a especular sobre a existência destas vastas estruturas que hoje denominamos galáxias. A tradução destes artigos clássicos, um sobre o desvio para o vermelho das galáxias de Erwin Hubble e outro contendo os textos transcritos do grande debate entre Curtis e Shapley são apresentadas nesta edição e complementam historicamente, a seção temática sobre galáxias.

Galáxias são grandes sistemas estelares, contendo de centenas de milhões a centenas de bilhões de estrelas. Suas dimensões se estendem de poucos a dezenas de quiloparsecs. Estas imensas estruturas cósmicas estão separadas por distâncias que podem chegar a megaparsecs, sendo que uma galáxia de grande porte pode estar rodeada de galáxias satélites menores. Além disto, elas podem formar sistemas gravitacionalmente ligados contendo desde dezena até milhares de galáxias. A compreensão da distribuição das galáxias no universo constitui um dos grandes desafios para os modelos de universo. O estudo do espectro das galáxias permitiu deduzir que o universo se encontra em expansão, possibilidade sugerida pela primeira vez pelo matemático russo Alexander Friedmann em artigo publicado também há aproximadamente 100 anos e que foi traduzido para o português nos *Cadernos de Astronomia* vol. 3, n. 1, em uma edição inteiramente dedicada à Friedmann e a expansão do universo. O estudo da dinâmica das galáxias permitiu identificar a distribuição de gases interestelar, componente importante das galáxias. Anomalias nas velocidades observadas dos constituintes das galáxias, em aparente contradição

com o que se deduz usando a gravitação newtoniana, levaram ao conceito de matéria escura, uma possível componente material exótica de natureza ainda desconhecida. A compreensão da distribuição das galáxias no espaço cósmico, dos seus processos dinâmicos e evolutivos, é uma das mais importantes chaves para a compreensão do fenômeno gravitacional e da evolução do universo como um todo.

O primeiro artigo da seção temática, escrito por Gastão B. Lima Neto (USP), apresenta uma visão geral sobre o tema, realçando as principais características das galáxias, sua classificação, propriedades, possíveis aspectos evolutivos, entre outras propriedades relevantes. A nossa galáxia, a Via Láctea, também chamada de a Galáxia (como nome próprio), é apresentada em detalhe no artigo seguinte escrito por Jaques Lépine (USP). Estamos, obviamente, dentro da Galáxia, o que dificulta conhecer sua forma precisa mas, por outro lado, permite determinar vários aspectos dinâmicos, seus constituintes, as propriedades dos braços espirais, auxiliando no estudo das demais galáxias observadas.

Um aspecto essencial também é o mapeamento das galáxias em grandes escalas. Isto é discutido no terceiro artigo dessa seção temática, escrito por Bruno Moraes (UFRJ). Este mapeamento da distribuição de galáxias no cosmo traz indicações tanto sobre o processo de formação destes objetos como também sobre a história e a dinâmica do universo como um todo. Os resultados, tanto observacionais quanto oriundos de simulações numéricas, têm se tornado cada vez mais precisos, levando a fortes vínculos aos modelos de formação de estruturas no universo.

A compreensão da dinâmica das galáxias levou ao paradigma da matéria escura, uma componente exótica da matéria que preenche o cosmo. Isto é discutido por Rubens Machado (UFTPR) no quarto artigo, onde as evidências para esta componente cósmica são relatadas. Obviamente, não se pode descartar que seja necessário mudar a teoria gravitacional (tanto relativística quanto newtoniana) para compreender a dinâmica dos objetos virializados (quer dizer, em equilíbrio dinâmico), mas a introdução da matéria escura fria continua sendo o enfoque mais popular tanto em astrofísica quanto em cosmologia.

Os artigos seguintes, mais específicos, escritos por Dinalva Sales (FURG) e Rainer Madjeski (UESB), tratam de duas classes de galáxias que têm sido particularmente estudadas nos últimos tempos: as galáxias de núcleo ativos (AGN), contendo buracos negros centrais supermassivos, e as galáxias anãs de luminosidade superficial extremamente fracas (UFD). Esta última parece ser amplamente dominada por matéria escura, e poderá ser um poderoso teste para o paradigma do setor escuro do universo e modelos cosmológicos. As AGNs, por outro lado, apresentam desafios importantes, inclusive para o próprio processo de formação dos buracos negros centrais supermassivos.

Alguns problemas de fronteira na modelização da galáxias, com um enfoque particular no fenômeno de fusão de galáxias, ingrediente importante no modelo hierárquico da matéria escura fria, são discutidos no artigo que fecha a seção temática escrito por Diego Lambas (Universidade Nacional de Córdoba, Argentina).

Esperamos assim fornecer uma ampla visão sobre o que compreendemos e o muito que ainda

resta a compreender sobre estes intrigantes objetos que são as galáxias. Os textos são escritos de forma a poderem ser lidos por leigos que queiram conhecer algo sobre este vasto tema, assim como por estudantes e pesquisadores em astrofísica e cosmologia que desejam ter um painel geral sobre as pesquisas atuais sobre galáxias.

Em outras seções dos CdA, são abordados temas como a astrofotografia, exoplanetas, lentes gravitacionais, a dicotomia materialismo-idealismo na física, a contribuição de Amoroso Costa para a ciência no Brasil, a corrida espacial entre EUA e URSS, entre outros. Em suas notas técnicas, o CdA homenageia também o cosmólogo russo Alexey Starobinsky e o físico ítalo-brasileiro Ennio Candotti, que faleceram recentemente, e que nos deixaram legados de extrema relevância em suas respectivas áreas de atuação.

Os Editores

Sumário

Seção Temática

Universo de galáxias	
<i>Gastão B. Lima Neto</i>	7
A Via Láctea, a nossa galáxia	
<i>Jacques Lépine</i>	18
Mapeamentos de galáxias	
<i>Bruno Azevedo Lemos Moraes</i>	39
Halos de matéria escura em galáxias	
<i>Rubens E. G. Machado</i>	66
Núcleos ativos de galáxias: uma breve introdução	
<i>Dinalva A. Sales</i>	82
Galáxias anãs de brilho ultrabaixo	
<i>Rainer Karl Madejsky</i>	88
Galáxias: uma perspectiva desde suas origens	
<i>Diego Garcia Lambas</i>	102
Divulgação Científica, Ciência & Sociedade	
Por que a União Soviética perdeu a corrida tripulada à Lua?	
<i>Alberto Silva Betzler</i>	107
O mundo físico: Materialismo ou Idealismo? Um olhar desde as ciências	
<i>Jorge Ernesto Horvath</i>	115
Sobre Amoroso Costa: uma conversa com Arthur Gerhardt Santos	
<i>Júlio C. Fabris e Luiz Filipe Guimarães</i>	124
Acompanhando e registrando a região ativa de manchas solares AR 3363 por 14 dias consecutivos	
<i>Vinícius Alessandro Silva Queiroz e Ricardo José Vaz Tolentino</i>	132

A ocultação de Marte pela Lua em 06 de setembro de 2020: contribuições da ciência aberta para a pesquisa em astronomia

Maria Paula de Freitas Novais e Ricardo José Vaz Tolentino 147

Lua, gigante cósmico! A Lua mais próxima da Terra (perigeu) e o Sol mais distante (afélio da Terra)

Luiz Ravell Andre Antonio Dias e Ricardo José Vaz Tolentino 153

Artigos

Machine learning: investigando a relação entre atmosferas biogênicas, exoplanetas e sistemas planetários

Luander Bernardes e Anna Carolina Martins 163

Ensino

Lentes gravitacionais de baixo custo: unindo analogias de observações astronômicas e a teoria do lenteamento gravitacional em sala de aula

Danyel C. de Oliveira e Habib S. Dumet-Montoya 174

Divulgação científica em astronomia para crianças no contexto pandêmico: uma proposta de disciplina eletiva para a licenciatura em pedagogia

Vitor Amorim et al. 187

Textos Clássicos

O grande debate sobre a estrutura do Universo

Júlio C. Fabris e Felipe T. Falciano 199

A relação velocidade-distância para as galáxias estabelecida por Edwin Hubble

Daniel Iria Machado 231

Notas

Alexei Alexandrovich Starobinsky (1948 – 2023)

Ilya L. Shapiro 241

Ennio Candotti (1942 – 2023)

Júlio César Fabris 245

Universo de Galáxias

Gastão B. Lima Neto

Universidade de São Paulo

Resumo

Galáxias são estruturas fundamentais no Universo. A descoberta da natureza extragaláctica das nebulosas espirais só ocorreu em meados dos anos 1920. Durante o século que se passou desde então, aprendemos muito sobre as galáxias. Este texto descreve como chegamos à conclusão de que o Universo é povoado de galáxias, muitas semelhantes à nossa própria, a Via Láctea. Veremos como classificamos as galáxias, quais são suas principais propriedades, como elas se formam e evoluem, e como estão distribuídas pelo Universo.

Abstract

Galaxies are fundamental structures in the Universe. The discovery of the extra-galactic nature of spiral nebulae only occurred in the mid-1920s. During the century that has passed since then, we have learned a lot about galaxies. This text describes how we came to the conclusion that the Universe is populated by galaxies, many similar to our own, the Milky Way. We will see how we classify galaxies, what their main properties are, how they form and evolve, and how they are distributed throughout the Universe.

Palavras-chave: galáxias: formação, morfologia, propriedades, estrutura em grande escala

Keywords: galaxies: formation, morphologie, properties, large scale structure

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43889](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43889)

1 Introdução

Em uma noite escura, com a Lua abaixo do horizonte, podemos perceber uma faixa nebulosa cruzando o céu de um lado a outro. Na Antiguidade, os Gregos chamavam esta faixa de *galaxías kyklos*, ou círculo leitoso (*gala* significa leite em grego). Esta faixa seria o leite derramado pela deusa Hera quando seu marido, Zeus, tentou fazê-la amamentar o pequeno Hércules. Os Romanos adotaram este nome e passaram a chamar esta faixa no céu de *via lactea*, ou caminho leitoso. Este é o nome que damos até hoje em português, Via Láctea (com acento agudo).

A natureza da Via Láctea permaneceu um mistério até Galileu Galilei descobrir algo que mudaria completamente nossa compreensão desta faixa nebulosa. Em 1609, ao apontar sua luneta para a Via Láctea, Galileu descobriu que ela era constituída de inúmeras estrelas. Galileu descobriu que a aparência leitosa era devida às estrelas distantes não resolvidas a olho nu.

A Via Láctea não é o único objeto nebuloso no céu. No Hemisfério Sul é possível observar em noites escuras as chamadas Nuvens de Magalhães.

No Hemisfério Norte, tem um pequeno objeto nebuloso, difícil de observar à olho nu, a Nebulosa de Andrômeda.

Com o início das observações astronômicas sistemáticas utilizando telescópios, o número de objetos nebulosos descobertos começou a aumentar durante o século 17. Em 1716, o astrônomo Edmond Halley (1656–1742) publica uma resenha sobre o que ele chama de nebulosas ou “manchas claras como nuvens entre as estrelas fixas”, relatando as descobertas de astrônomos do século 17 como Giovanni Hodierna (1597–1660), Ismaël Bullialdus (1605–1694) e Johannes Hevelius (1611–1687).

Já na metade do século 18, o astrônomo inglês Thomas Wright (1711–1786) sugere em uma série de artigos que as nebulosas seriam como a Via Láctea, composta por uma distribuição de estrelas. Um modelo em particular, sugere que as estrelas da Via Láctea estariam distribuídas em uma concha esférica. O filósofo alemão Immanuel Kant (1724–1804) adota este pensamento, imaginando o Universo infinito com inúmeras nebulosas como a Via Láctea. Esta ideia foi chamada

mais tarde por Alexander von Humboldt (1769–1859) de universos-ilhas.

O primeiro catálogo de nebulosas (objetos de aparência difusa quando observados nos telescópios da época) foi elaborado pelo francês Charles Messier (1730–1817). Entre 1774 e 1781, Messier catalogou 103 objetos difusos (7 foram acrescentados posteriormente). Destes, 40 são de fato galáxias.

Messier estava interessado em cometas, algo ainda enigmático na época, e catalogava objetos difusos para que não fossem confundidos com cometas. O astrônomo germano-ingles William Herschel (1738–1822) elevou nosso conhecimento de nebulosas para um outro patamar. Junto com sua irmã, Caroline Herschel (1750–1848), eles catalogaram cerca de 2500 nebulosas entre 1780 e 1802. O filho de William, John Herschel (1792–1871) dá continuidade ao catálogo acrescentando nebulosas observáveis do Hemisfério Sul. Em 1864, o catálogo tinha cerca de 5000 nebulosas.

Expandindo o catálogo de Herschel, John Dreyer (1852–1926) publica o *New General Catalog*, NGC, com 7840 objetos (muitos dos quais são galáxias) em 1888. Este catálogo e seu suplemento, o *Index Catalog* com mais 5386 objetos (também publicado por Dreyer) são ainda muito utilizados hoje em dia, especialmente quando estamos interessados em galáxias próximas e brilhantes.

Com o advento de telescópios maiores e de melhor qualidade, foi possível a descoberta de estruturas em algumas nebulosas. Em 1845, usando um telescópio de 1,83 metros de diâmetro (o maior do mundo na época) construído em seu castelo, Lord Rosse (William Parsons, 1800–1867) descobre que muitas espirais possuem uma estrutura espiral, isto é, “braços” espirais.

Desde meados do século 19, os astrônomos notavam uma segregação. Na região da Via Láctea não se encontravam nebulosas espirais ou globulares. Em um livro de 1882, Joseph Gillet e William Rolfe ilustram esta segregação graficamente (Fig. 1). Esta observação era usada como um argumento de que as nebulosas teriam uma relação com a Via Láctea e, provavelmente, fariam parte dela. Hoje sabemos que não observamos galáxias na região do céu ocupada pela nossa Galáxia devido à absorção pelo meio interestelar.

No final do século 19 e início do século 20,



Figura 1: Ilustração do livro *Astronomy for the use of schools and academies*, de J.A. Gillet e W.J. Rolfe (1882), mostrando que onde está a maior parte das estrelas (na região da Via Láctea), há poucas nebulosas e vice-versa. A relação entre nebulosas e a Via Láctea ainda não era conhecida na época

uma discussão intensa girava em torno da natureza da Via Láctea e das nebulosas graças às observações que se acumulavam. Um dos modelos mais populares, baseados na representação de William Herschel de 1785, descrevia a Via Láctea como uma distribuição achatada de estrelas, com o Sol muito próximo do centro. Jacobus Kapteyn (1851–1922), usando o método de contagem de estrelas como Herschel fez, chega a uma conclusão semelhante durante as primeiras décadas do século 20, estimando o diâmetro da Via Láctea em 20 kpc. Por outro lado, Harlow Shapley (1885–1972) estuda a distribuição de aglomerados globulares no céu e estima a distância destes objetos usando estrelas variáveis. Shapley conclui que a Via Láctea tem cerca de 100 kpc de diâmetro e o Sol se encontra distante do centro, a cerca de 15 kpc.

Segundo Kapteyn e colaboradores, as nebulosas seriam como a Via Láctea, ilhas no Universo (como Wright e Kant imaginavam), enquanto Shapley e colaboradores acreditavam que as nebulosas fariam parte da Via Láctea. Em 1920, em Washington/EUA, houve um evento que ficou conhecido como Grande Debate, onde Shapley e Herber Curtis (1872–1942) apresentaram

suas respectivas visões de mundo (Curtis era defensor do modelo de Kapteyn). Este debate é muitas vezes associado ao início da Astronomia Extragaláctica.

Enquanto isto, Vesto Slipher (1875–1969) começou a obter sistematicamente o espectro de nebulosas espirais. Com espectros de boa qualidade é possível determinar a velocidade radial uma vez que linhas espectrais aparecem deslocadas em relação ao espectro de um objeto em repouso. Em 1917, Slipher já tinha medido o espectro de 25 nebulosas espirais; destas 3 tinham velocidade em nossa direção e 22 nebulosas estavam se afastando. As velocidades medidas eram muito mais elevadas do que as das estrelas que já haviam sido observadas. O trabalho de Slipher sugeria fortemente que estas nebulosas não poderiam fazer parte da Via Láctea.

Finalmente, entre 1908 e 1912, Henrietta Leavitt (1868–1921) fez um estudo aprofundado de estrelas variáveis, identificando mais de 1700 objetos. Em 1912, ela publicou a famosa relação período-luminosidade de estrelas Cefeidas, a partir de um conjunto de 25 estrelas deste tipo identificadas na Pequena Nuvem de Magalhães. Quanto mais luminosa é a estrela Cefeida, maior é o seu período de variabilidade. A relação período-luminosidade permite a determinação da distância destas estrelas, uma vez que medimos sua magnitude aparente e o período de pulsação da estrela Cefeida, através da relação de Leavitt, nos dá a luminosidade da estrela ou, equivalente, sua magnitude absoluta. A diferença entre a magnitude aparente e a absoluta nos dá diretamente a distância.

Em 1917, entra em operação o então maior telescópio do mundo, o Hooker com 2,5 metros de diâmetro, no Monte Wilson (Califórnia/EUA). A partir de 1922, Edwin Hubble (1889–1953) começa a observar com este telescópio. Graças ao seu tamanho, Hubble pôde resolver estrelas Cefeidas em algumas nebulosas e, usando a relação período-luminosidade de Leavitt, determinou a distância destas nebulosas. Com as observações de 1924, Hubble inicialmente publica em 1925 as distâncias das nebulosas de Andrômeda (M31) e da nebulosa do Triângulo (M33), mostrando de forma conclusiva que estes objetos não podem fazer parte da Via Láctea por estarem tão distantes. Nos anos seguintes, a determinação das distâncias

de outras nebulosas confirmam esta conclusão.

A partir de 1926, fica claro que as nebulosas espirais e as nebulosas elípticas (de forma arredondada) são, de fato, objetos extragaláticos, isto é, galáxias como a nossa Via Láctea.

2 Classificação morfológica

Quando queremos entender melhor uma classe de objetos, uma das maneiras mais práticas e de bons resultados é através de um sistema de classificação. Um exemplo disto está na biologia, quando Carl von Linné (1707–1778) propõe em 1728 um sistema de classificação de plantas baseado na forma, isto é, morfológica, dos órgãos de reprodução, Estame e Pistilo.

Antes mesmo de reconhecermos a natureza extragalática das nebulosas, já havia propostas de classificação morfológica. Max Wolf (1863–1932) em 1908 e John Reynolds (1874–1949) em 1920 publicam sistemas de classificação de nebulosas (incluindo galáxias).

Em 1926, Hubble publica o primeiro sistema de classificação de galáxias propriamente ditas. Esta primeira versão propunha uma sequência, começando pelas galáxias de forma mais esféricas, indo para as mais achatadas e, em seguida, bifurcando em duas sequências paralelas, uma de galáxias espirais normais e outra de espirais barradas (isto é, com uma estrutura central linear, como uma barra). Em 1936, Hubble modifica seu sistema de classificação ficando parecido com o que usamos até hoje, incluindo as galáxias lenticulares, de morfologia intermediária entre elípticas e espirais. Também inclui as galáxias irregulares, além da sequência das espirais. Por causa da bifurcação entre espirais normais e barradas, o sistema de classificação de Hubble é conhecida como sistema de diapasão (veja Fig. 2).

O sistema de Hubble teve algumas mudanças, notadamente por Erik Holmberg em 1958, Gérard de Vaucouleurs em 1959 e Allan Sandage em 1961, com algumas subdivisões, inclusão de dois tipos de galáxias irregulares (Irr1 e Irr2), presença ou não de anéis (estrutura circular em torno da galáxia). Contudo, a essência da classificação de Hubble continua a mesma, uma sequência que começa com as galáxias ditas *early type* (traduzido como: tipo precoce), as elípticas e lenticulares,

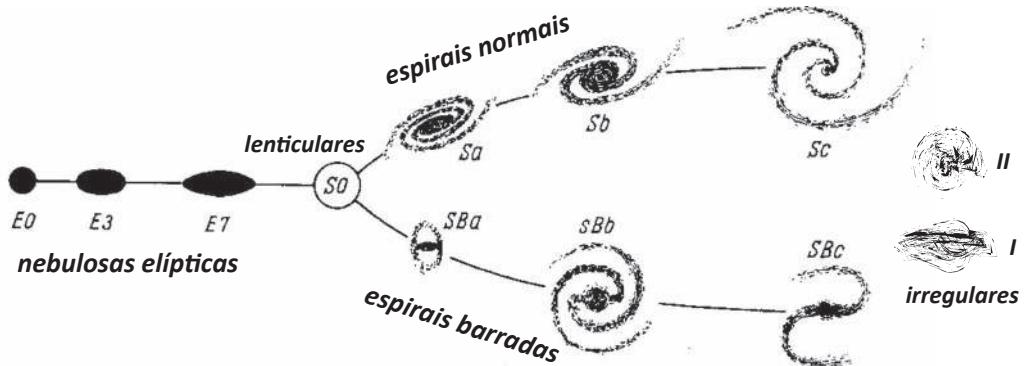


Figura 2: Classificação morfológica em diapasão de Hubble (1936).

passa pelas espirais e termina nas irregulares (estas duas últimas ditas *late type* (traduzido como: tipo tardio). Apesar da nomenclatura, a classificação morfológica de Hubble não é uma sequência evolutiva. No início do século 20, acreditava-se que as estrelas se formavam quente, *early type*, O, B, A, e esfriavam durante sua vida, tornando-se estrelas frias, *late type*, K, M (mais tarde descobrimos que as estrelas não evoluem assim).¹ Hubble, contudo, usou *early* e *late* no sentido de mais simples para mais complexo em termos de morfologia e esta denominação é ainda usada frequentemente hoje em dia.

O sucesso da classificação de Hubble vem de sua simplicidade e das correlações observadas de propriedades observacionais e físicas globais das galáxias ao longo da sequência morfológica. Por exemplo, galáxias *early type* são geralmente de cor vermelha enquanto galáxias *late type* são mais azuladas. As galáxias *early type* são mais pobres em gás e poeira no meio interestelar, enquanto que as galáxias *late type* possuem mais gás e poeira. Por isto, podemos concluir que as galáxias *early type* não formam mais estrelas, isto é, suas estrelas já são velhas. Já as galáxias *late type* ainda estão formando estrelas ativamente, como, por exemplo, a Via Láctea, que atualmente forma cerca de $1 M_{\odot}$ de estrela por ano, em média.

¹Desde o início do século 20, as estrelas são classificadas espectralmente pela sua temperatura superficial usando as letras O, B, A, F, G, K e M, onde o tipo O é a mais quente e as estrelas de tipo M, as mais frias. Era comum dizer que as estrelas mais quentes eram de tipo *early* e as mais frias de tipo *late*. As letras estão fora de ordem alfabética porque elas se referiam originalmente à intensidade das linhas do hidrogênio (tipo A com linhas mais fortes, tipo O praticamente sem linhas do hidrogênio aparentes no visível).

A classificação de Hubble foi desenvolvida a partir de observações no óptico, o que corresponde às bandas (filtros) fotométricos clássicos *B* (azul) e *V* (visível). Além disto, esta classificação foi feita para galáxias relativamente brilhantes, portanto, relativamente próximas. Tomando a nossa vizinhança celeste, dentro de um raio de aproximadamente 1 Gpc, nos temos 70% de galáxias espirais, 14% de lenticulares, 10% de elípticas e 6% de irregulares.

A classificação morfológica é baseada nas observações feitas no visível e em um intervalo de brilho superficial acessível às observações feitas na primeira metade do século 20. Isto significa que a classificação morfológica de Hubble privilegia certos tipos de galáxias (por exemplo as de maior taxa de formação estelar) em detrimento de outras (as galáxias anãs e as de fraco brilho superficial).

Quando as galáxias começaram a ser observadas em outros comprimentos de onda, além do visível, ficou claro que a classificação morfológica depende da banda fotométrica utilizada. Por exemplo, uma galáxia espiral observada no ultravioleta distante poderia ser classificada como uma irregular, já que veríamos principalmente as regiões de formação estelar intensa.

2.1 Galáxias elípticas

Galáxias elípticas são geralmente objetos com pouco ou nenhuma estrutura, suas estrelas estão em uma distribuição elipsoidal ou esférica. A Fig. 3 mostra algumas elípticas típicas.

No sistema morfológico de Hubble, as galáxias elípticas são classificadas segundo seu grau de achatamento aparente, isto, de sua imagem pro-

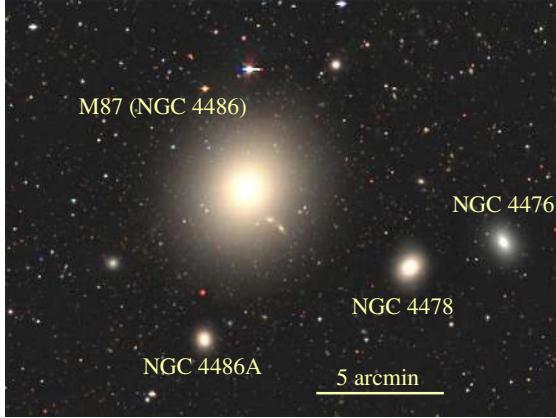


Figura 3: Exemplo de galáxias elípticas. M87, NGC 4476 e NGC 4486A são classificadas como elípticas. Com NGC 4478, há controvérsia, alguns classificam como elíptica outros como lenticular. Imagem do DESI Legacy Survey.

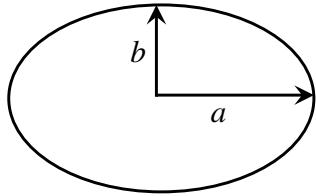


Figura 4: Classificação de galáxias elípticas segundo seu achatamento aparente. Os semi-eixos maior e menor são a e b , respectivamente.

jetada no céu (veja a Fig. 4). A notação é a letra “E” seguida de um número n dado pelo valor inteiro de $n = 1 - b/a$.

Assim, E0 significa uma elíptica com imagem redonda; E5 é uma elíptica onde o semi-eixo maior é o dobro do semi-eixo menor. Como a forma é projetada no céu, uma E0 pode ser esférica como também pode ser uma E7 vista de frente (na direção do eixo-maior).

Esta escala vai até E7. Não são observadas galáxias elípticas mais achatadas do que as E7. A razão disto é que elípticas mais achatadas são dinamicamente instáveis e, caso algum processo pudesse gerar elípticas mais achatadas, elas rapidamente se tornariam mais arredondadas, com um achatamento menor.

As maiores galáxias elípticas não são achatadas por efeito de rotação, mas sim devido à anisotropia da distribuição de velocidades. Nestas elípticas, as estrelas se movem com mais velocidade em média em uma direção (a do semi-eixo maior) e mais lentamente na direção do eixo menor.

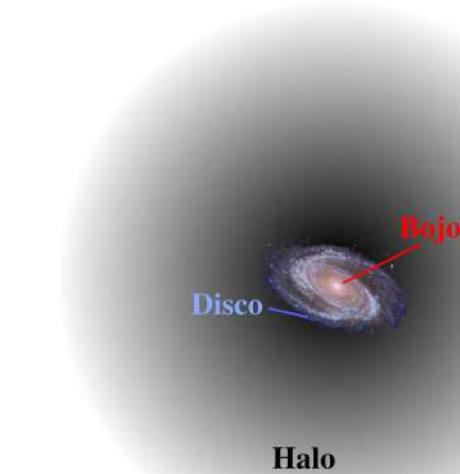


Figura 5: Representação de uma galáxia espiral com suas principais componentes: bojo, disco e halo

2.2 Galáxias espirais

As galáxias espirais têm como principal característica a presença de braços espirais que partem do centro da galáxia, a região chamada de bojo, ou de uma estrutura em forma de barra da região central. Os braços têm este destaque por terem uma população estelar mais jovem, portanto com estrelas muito luminosas e azuladas.

As galáxias espirais têm 3 componentes principais: o bojo central, o disco estelar e o halo (Fig. 5). O bojo tem a maior densidade de estrelas, portanto é a componente mais brilhante. O disco, onde estão os braços espirais, contém a maior parte das estrelas e é a componente mais luminosa. O halo, que geralmente assumimos de forma aproximadamente esférica, contém a maior parte da massa.

O bojo é uma componente que é semelhante à uma mini galáxia elíptica, com uma população estelar mais envelhecida e uma distribuição elipsoidal de estrelas. Algumas galáxias espirais têm um pseudo-bojo, uma estrutura central semelhante ao bojo clássico, mas com estrelas mais jovens e uma rotação mais importante. O pseudo-bojo é o resultado de uma evolução lenta que ocorre em algumas galáxias.

Os braços espirais são ondas de densidade que se propagam no disco. A forma dos braços não muda devido à rotação da galáxia. Devido à compressão do gás, a formação de estrelas é mais

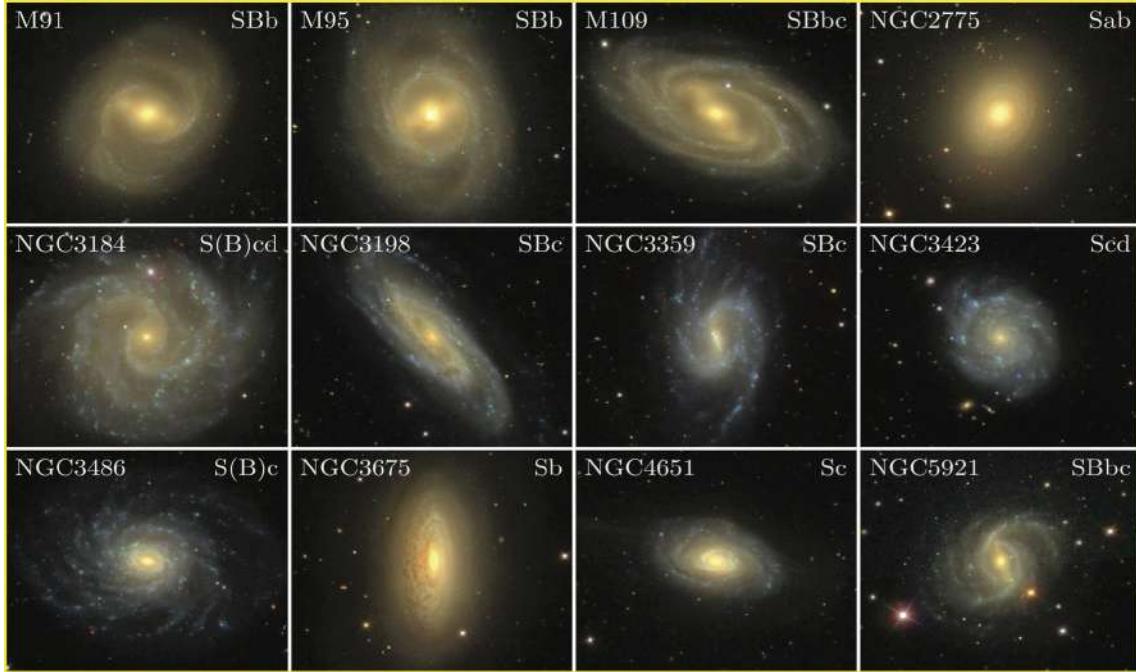


Figura 6: Exemplo de galáxias espirais com suas respectivas classificação morfológica. Imagens obtidas do Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Quando tem um (B), significa que a barra estelar é relativamente fraca.

acentuada nesta região. Desta forma, os braços se sobressaem nas observações óticas porque ele é traçado por estrelas jovens e massivas (e por isso muito luminosas).

Estas ondas de densidade são o resultado de uma perturbação no disco galáctico. Discos auto-gravitantes são intrinsecamente instáveis à certas perturbações. Estas perturbações podem ser internas, devidas à própria distribuição das estrelas ou interações entre as diferentes componentes, ou podem ser de origem externa, devido à passagem próxima de uma outra galáxia.

Além deste tipo de instabilidade, os discos auto-gravitantes quando são perturbados formam com certa facilidade uma barra central (as chamadas espirais barradas).

A geometria do halo massivo também pode provocar um outro tipo de perturbação. Se o halo por suficientemente achatado e seu eixo não coincidir com o eixo do disco estelar, este irá se “torcer” (do inglês, *to warp*). Este efeito é particularmente difícil de ser observado devido à projeção da galáxia no plano do céu). Algumas observações (ou melhor, análises) sugerem que nossa própria galáxia seja “torcida” (*warped*).

Finalmente, a passagem próxima ou o canibalismo de pequenas galáxias, causam uma trans-

ferência da energia cinética orbital para energia cinética interna da galáxia, no caso, do disco estelar. Isto produz um aumento principalmente na espessura do disco. Deve-se notar que mesmo na ausência de perturbadores externos, o disco estelar aumenta de espessura espontaneamente devido aos encontros entre as estrelas e entre as estrelas e nuvens massivas (que possuem algumas dezenas ou centenas de massas solares).

Na classificação morfológica de Hubble, as espirais são notadas de Sa até Sd (na versão original tinha apenas 3 categorias) e SBa até SBd, no caso das barradas. Cerca de 50% a 60% de galáxias espirais tem uma barra proeminente. A Fig. 6 ilustra vários exemplos de galáxias espirais com suas classificações.

A subdivisão, de a à d, pode ser feita em relação à luminosidade relativa do bojo em relação ao disco. Nas Sa, a luminosidade do bojo chega ser um pouco superior à metade da luminosidade do disco, isto é, $L_{\text{bojo}}/L_{\text{disco}} \simeq 0,5$. Esta razão é aproximadamente 0,45, 0,32, 0,15 e 0,10 para os subtipos Sb, Sbc, Sc e Sd (Sbc é o tipo intermediário entre Sb e Sc).

Outro critério usado é a abertura dos braços espirais. As Sa têm braços com menos abertura, enquanto as Sc e Sd têm a maior abertura.

2.2.1 A Via Láctea

O Sistema Solar faz parte de uma galáxia que chamamos de Via Láctea. É uma galáxia espiral barrada de tipo SBbc, com quatro braços espirais. O disco estelar da Via Láctea tem cerca de 15 kpc de raio e menos de 1 kpc de espessura, e o Sol se encontra a cerca de 8 kpc do centro, muito próximo do plano galáctico.

O espaço entre as estrelas não é vazio, o Meio Interestelar (MIS) contém cerca de 10% da massa visível da Via Láctea. Aproximadamente, 99% do MIS está na forma de gás e 1% de poeira.

No centro da Via Láctea existe um buraco negro supermassivo com cerca de $3 \times 10^6 M_{\odot}$.

2.3 Galáxias lenticulares

Galáxias com este tipo morfológico têm uma forma de disco com um grande bojo central. As galáxias lenticulares são chamadas S0 ou SB0 (normais e barradas, respectivamente). Estas galáxias têm um bojo muito grande em relação ao disco, geralmente fraco e sem a presença de braços espirais. A formação estelar é muito pequena ou nula. Isto significa que estas galáxias tem cores semelhantes às elípticas e também são consideradas *early type*.

As S0s podem ser facilmente confundidas observacionalmente (pelo imageamento) com elípticas que possuam um envelope estelar estendido. Algumas destas galáxias apresentam poeira em seus discos estelares. Galáxias lenticulares são geralmente encontradas em ambientes mais densos, como os aglomerados de galáxias.

2.4 Galáxias irregulares

A galáxias que não são espirais, elípticas ou lenticulares são classificadas de irregulares (lembrando que estamos lidando com galáxias brilhantes e relativamente próximas). Elas não apresentam nenhuma forma ou simetria bem definida.

As galáxias satélites da Via Láctea, as Nuvens de Magalhães, são exemplos clássicos de irregulares. Na classificação de Hubble estas galáxias são notadas Irr I e Irr II. As Irr I são semelhantes à Grande Nuvem de Magalhães, com alguma pequena indicação de estrutura simétrica, como uma barra. As Irr II por sua vez não apresentam nenhum traço de simetria.

Galáxias com muita poeira também podem ter aparência irregular quando observadas no visível, apesar de pertencerem a outra classe morfológica. No sistema de classificação morfológico de Vaucouleurs, as galáxias irregulares são classificadas como Sm ou Im.

2.5 Galáxias anãs

A maior parte das galáxias do Universo são as chamadas anãs, de baixa luminosidade e massa quando comparadas com as galáxias ditas normais, isto é, $L \lesssim 5 \times 10^8 L_{\odot}$ no visível. A grande maioria das galáxias vizinhas da Via Láctea são anãs. As Nuvens de Magalhães estão na fronteira: para alguns autores elas são galáxias normais, para outros anãs.

As galáxias anãs têm sua própria classificação morfológica: anãs irregulares (ricas em gás, com formação estelar), anãs elípticas (semelhantes às elípticas normais, mas com massa total inferior à $\sim 10^9 M_{\odot}$, e as anãs esferoidais (pobres em gás e com baixo brilho superficial). Um exemplo de anã elíptica é M32, satélite da galáxia de Andrômeda, descoberta por Charles Messier.

2.6 Galáxias em alto redshift

A classificação em diapasão de Hubble só é válida para galáxias com baixo *redshift* cosmológico. As galáxias mais distantes são muito mais irregulares e, a partir de um certo ponto não observamos mais galáxias como as espirais, com discos estelares.

As galáxias já começam a se formar (isto é, já são estruturas gravitacionalmente ligadas e com formação estelar) depois de algumas centenas de milhões de anos após o *big bang*. A partir deste momento, a taxa de formação estelar (em galáxias) aumenta gradativamente até quando o universo tem cerca de 3 a 4 bilhões de anos. Quando o Universo tem cerca de 6 bilhões de anos, esta taxa de formação estelar começa a diminuir e assim continua até os dias de hoje.

Um dos desafios atuais é a observação das primeiras galáxias que se formaram no Universo. Telescópios como o James Webb Space Telescope e o futuro Giant Magellanic Telescope nos darão uma visão muito mais completa dos eventos da época da formação de galáxias.

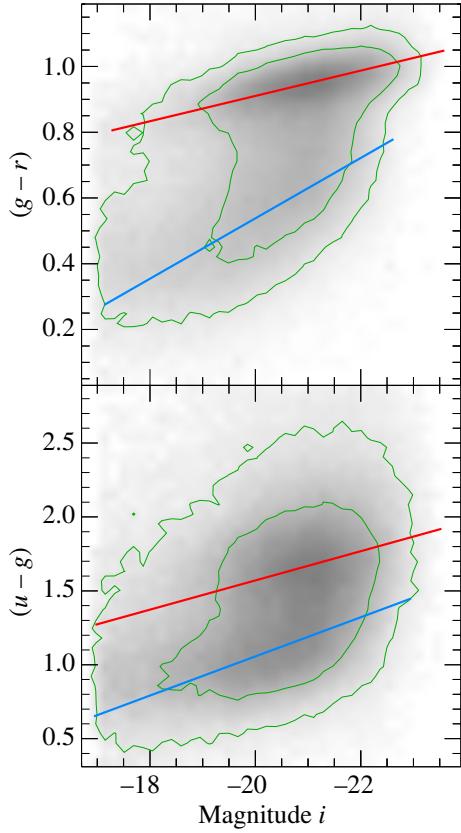


Figura 7: Relação cor–magnitude de um conjunto de $\sim 183\,000$ galáxias mostrando o caráter bimodal da distribuição das propriedades das galáxias. Nos diagramas cor–magnitude são mostradas a sequência vermelha das elípticas e lenticulares, e a nuvem azul das espirais e irregulares. Figura adaptada de Blanton et al. 2003.

3 Relação cor–magnitude de galáxias

Com levantamentos de centenas de milhares de galáxias, por exemplo o SDSS, estudos estatísticos das propriedades das galáxias se tornaram muito mais precisos. Um fato notável foi a confirmação de uma bimodalidade das propriedades físicas das galáxias no Universo local ($z \lesssim 0,25$). Tomando a relação cor $(g-r) \times$ magnitude i , notamos claramente a presença de duas concentrações na distribuição das galáxias, que correspondem às galáxias azuis e vermelhas (veja Fig. 7). Esta bimodalidade vermelha/azul já não é tão clara usando o índice de cor $(u-g)$.

As galáxias vermelhas se distribuem ao longo de uma linha no diagrama cor–magnitude, a chamada sequência vermelha. Também notamos que as galáxias vermelhas são, em média, mais luminosas do que as galáxias azuis. As galáxias

azuis se encontram em uma região chamada nuvem azul.

Entre a sequência vermelha e a nuvem azul há uma região intermediária com número menor de galáxias, o chamado Vale Verde (*Green Valley*). Esta é uma região de transição no diagrama cor–magnitude das galáxias. Possivelmente, as galáxias iniciam sua evolução na região da nuvem azul (com alta taxa de formação estelar) e caminhem para a sequência vermelha. Os mecanismos por trás desta evolução devem ser o *feedback* de supernovas e do núcleo ativo central (que todas as galáxias massivas parecem ter), e os efeitos do meio ambiente como a *ram-pressure* (pressão de arraste), por exemplo. Aparentemente, a galáxia de Andrômeda e talvez a Via Láctea estejam hoje no Vale Verde, com suas respectivas taxas de formação estelar caindo.

4 Distribuição de galáxias

As galáxias não se distribuem pelo Universo de forma aleatória. Devido à gravitação, as galáxias tendem a se agruparem. A maior parte das galáxias se encontram em estruturas gravitacionalmente ligadas.

Aglomerações com até várias dezenas de galáxias brilhantes são chamadas de grupos. Grupos com algumas poucas galáxias são chamados de grupos pobres. A Via Láctea, juncos com M31 (galáxia de Andrômeda), M33, a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães e mais cerca de 60 galáxias anãs formam o chamado Grupo Local.

O Grupo Local tem uma massa total de cerca de $3 \times 10^{12} M_{\odot}$, sendo dominado dinamicamente por nossa galáxia e M31. Grupos ricos podem chegar até cerca de $10^{14} M_{\odot}$ com várias dezenas de galáxias brilhantes.

Os grupos de galáxias podem ser relativamente rarefeitos (grupos soltos, como o Grupo Local) ou compactos, onde as galáxias estão praticamente se tocando de tão próximas que estão uma das outras. Grupos compactos são particularmente interessantes para o estudo da evolução de galáxias em ambientes densos. A fig. 8 mostra exemplos destes tipos de grupos de galáxias.

Alguns grupos têm apenas uma galáxia muito brilhante no centro (geralmente uma galáxia elíptica), cercada de galáxias mais fracas em volta.



Figura 8: Exemplos de grupos de galáxias. ACIMA: grupo solto, com poucas galáxias (imagem do unWISE Survey). MEIO: grupo fóssil, com uma elíptica gigante central (imagem do DESI Survey). ABAIXO: grupo compacto. A galáxia espiral azulada, na parte inferior não faz parte do grupo, é uma galáxia que por acaso está na frente (imagem do SDSS).

Quando estes grupos tem uma emissão forte em raios-X, indicando uma massa elevada, são chamados de grupos fósseis (veja Fig. 8).

Sistemas ligados gravitacionalmente e em equilíbrio (ou próximo do equilíbrio) com massa superior à $10^{14} M_{\odot}$ são chamados aglomerados de galáxias. Em um Universo dominado pela matéria escura fria (CDM, de *Cold Dark Matter*), os aglomerados de galáxias são as últimas e mais

massivas estruturas formadas.

Os maiores aglomerados de galáxias do Universo chegam a ter até cerca de $5 \times 10^{15} M_{\odot}$ e têm um diâmetro de cerca de 4 a 5 Mpc com milhares de galáxias brilhantes.

Aglomerados de galáxias têm três componentes principais: as galáxias que contam com cerca de 2 a 3% da massa total, um gás muito quente e rarefeito entre as galáxias que contribuem com 12 a 13% da massa total e a CDM, com 85% da massa total. O gás intra-aglomerado tem uma temperatura que está no intervalo de cerca de 10^7 a 10^8 K, mais quente que o núcleo do Sol. Este gás é um forte emissor de raios-X.

Estruturas maiores, como super-aglomerados e os filamentos cósmicos, com tamanhos que variam entre dezenas a centenas de milhões de parsecs, estão fora de equilíbrio e não consideramos como estruturas já formadas. Muitos grupos e aglomerados de galáxias se encontram nestes super-aglomerados e filamentos.

Finalmente, também temos grandes regiões no Universo onde praticamente não há galáxias. São os chamados vazios cósmicos. Estas regiões têm, aproximadamente, entre 30 e 100 Mpc de diâmetro. A fronteira dos vazios são os filamentos e “muros” cósmicos.

5 Formação e evolução de galáxias

A principal força por trás da formação de estruturas no Universo, desde estrelas até aglomerados de galáxias, é a gravitação. Uma vez fora de equilíbrio, a matéria colapsa e forma diversos tipos de objetos.

Com esta ideia, em 1962, Ollin Eggen, Donald Lynden-Bell e Allan Sandage propuseram o chamado modelo monolítico, onde as galáxias espirais se formariam a partir do colapso de uma grande massa de gás.

Neste cenário, uma grande nuvem de hidrogênio e hélio primordial, com diâmetro de cerca de 100 kpc e com um pouco de rotação, começa a colapsar devido à instabilidade gravitacional. Durante esta fase de cerca de centenas de milhões de anos, algumas estrelas e os aglomerados globulares se formam no halo. Devido à dissipação de energia e conservação do momento angular, o gás resfria e se acumula em um disco em rotação

rápida: lá, as estrelas passam a se formar continuamente. Após o colapso, não há mais formação de estrelas no halo. O gás no disco permite a formação de estrelas até hoje.

O resultado deste processo é de um disco com formação estelar (algumas massas solares por ano se tornando estrelas, em média) e uma população mais velha de objetos no halo (estrelas de baixa massa e aglomerados globulares).

Este modelo, inicialmente foi também proposto para galáxias elípticas por Richard Larson em 1974. Neste caso, o momento angular é muito pequeno (praticamente não há rotação) e a maior parte do gás se transforma em estrelas durante o colapso.

Contudo, este modelo não explica adequadamente algumas propriedades observacionais. Na Via Láctea e muitas outras galáxias, observa-se aglomerados globulares de diferentes metalicidades. Isto significa que estes aglomerados não se formaram simultaneamente, contrariamente ao previsto pelo modelo de colapso monolítico. Também observamos que muitas estrelas do halo giram no sentido inverso do disco, em desacordo com o modelo monolítico.

Um modelo alternativo foi proposto em 1978 por Leonard Searle e Robert J. Zinn e desenvolvido por Simon White, Martin Rees e Carlos Frenk (1978 e 1991), Blumenthal e colaboradores (1984). Este cenário se mostrou mais satisfatório quando foi reconhecido que o modelo que melhor representa nossas observações são dominados pela chamada matéria escura fria. Em modelos cosmológicos onde a maior parte da matéria é CDM, as primeiras estruturas que colapsam são de pequena massa, por volta de 10^5 a $10^6 M_{\odot}$. Objetos de maior massa são formados por fusões sucessivas, no que é chamado de modelo hierárquico.

A sequência de fusões do modelo hierárquico pode ser representada por uma “árvore de fusões” (Fig. 9), mostrando de forma gráfica o crescimento dos objetos de interesse.

Os objetos que colapsam no modelo hierárquico são halos de matéria escura. A matéria “normal” formada de átomos constitui apenas cerca de 10% de toda a matéria e flui para o centro dos halos de matéria escura fria. No centro dos halos, quando o gás consegue se resfriar, há formação de estrelas.

Outro aspecto importante é o meio ambiente onde as galáxias vivem. Uma relação, já obser-

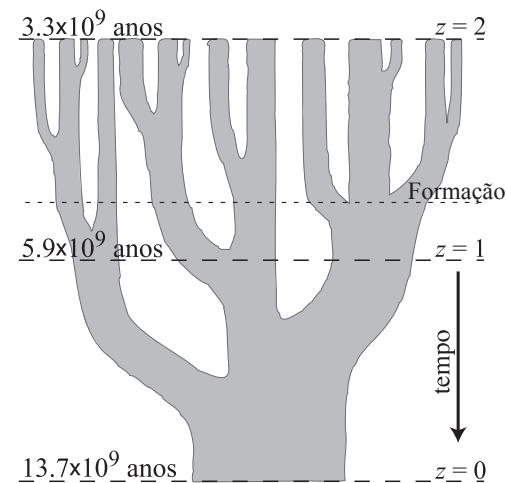


Figura 9: Exemplo de uma “árvore de fusões”, representando a sequência de fusões em um Universo dominado por CDM em que estruturas maiores se formam por fusões sucessivas (modelo hierárquico). A largura dos “caules” e do tronco representam a massa dos objetos. De forma arbitrária, podemos definir a formação de um objeto (uma galáxia, por exemplo) como o momento em que metade de sua massa já tenha sido incorporado. O *redshift* cosmológico é representado por z e o tempo à esquerda corresponde à idade do Universo.

vada por Hubble, foi mostrada de forma mais rigorosa por Alan Dressler em 1980 e chamada de segregação morfológica. Galáxias de tipo *early* (elípticas e lenticulares) se encontram preferencialmente em ambientes mais densos, como aglomerados de galáxias. Já as galáxias de tipo *late* se encontram mais frequentemente em grupos esparsos e no campo. A segregação morfológica nos diz que o meio ambiente afeta a evolução de galáxias.

Um aspecto desta relação é chamado de preprocessamento. Antes de chegarem nos aglomerados, muitas galáxias vivem em grupos; os grupos podem colidir e se fundirem formando estruturas maiores, até aglomerados. Nos grupos, as galáxias já sofrem efeitos ambientais e quando passam a fazer parte dos aglomerados, já estão preprocessadas.

Além de observações cada vez mais profundas² e de melhor qualidade em todos os comprimentos de onda, muito do que estamos aprendendo sobre a formação e evolução de galáxias vem de simulações numéricas. Nestas simulações, partimos de

²No estudo da origem e evolução de galáxias, destacamos, por exemplo, telescópios como James Webb Space Telescope (JWST) e os futuros grandes telescópios Giant Magellanic Telescope (GMT, com participação brasileira), e European Extremely Large Telescope (EELT).

condições iniciais de quando o Universo era relativamente homogêneo, há mais de 13 bilhões de anos atrás, e seguimos a evolução das estruturas do Universo obedecendo às leis da física como a gravitação e hidrodinâmica. Também é levado em conta processos físicos como formação de estrelas, explosão de supernovas, núcleos ativos em galáxias, por exemplo.

Desta forma, podemos responder à pergunta: o que são galáxias?. De forma sucinta, são halos de matéria escura com estrelas (com gás e poeira, geralmente), em equilíbrio gravitacional. Além disto, todas as galáxias com uma componente esferoidal (galáxias elípticas e galáxias com bojo central) possuem um buraco negro supermassivo (isto é com massa superior a cerca de $10^6 M_{\odot}$) no centro. Até hoje não se conhece uma galáxia sem matéria escura, ainda que alguns objetos aparentemente podem ter uma deficiência de matéria escura como NGC 1277 segundo estudo publicado em 2023 por Sébastien Comerón e colaboradores.

Por fim, incluo na seção de referências, alguns livros que servem de introdução e de aprofundamento aos assuntos aqui abordados.

Agradecimentos

Agradeço o apoio financeiro do CNPq, processo 303130/2019-9.

Sobre o autor

Gastão B. Lima Neto (gastao@astro.iag.usp.br)

é formado em Física pela Universidade de São Paulo, fez o Mestrado em Física no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP) e Doutorado em Física no Observatório de Meudon-Paris, França. Após pós-doutorados em Potsdam, na Alemanha, Lyon e Paris, na França, atua como professor do Departamento de Astronomia do IAG/USP desde 1998. Sua pesquisa aborda a astrofísica extragaláctica, com interesse na emissão de raios-X de grupos e aglomerados de galáxias, simulações numéricas de N -corpos e fotometria óptica de galáxias.

Referências

- [1] F. Combes et al., *Galaxies and Cosmology* (Springer Berlin Heidelberg, 1995).
- [2] D. M. Elmegreen, *Galaxies & Galactic Structure* (Prentice Hall, 1997).
- [3] H. Mo, F. van den Bosch e S. White, *Galaxy Formation and Evolution* (Cambridge University Press, 2010).
- [4] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction* (Springer Berlin Heidelberg, 2015).
- [5] L. S. Sparke e J. S. Gallagher, III, *Galaxies in the Universe: An Introduction* (Cambridge University Press, 2007), 2 ed.

A Via Láctea, a nossa galáxia

Jacques Lépine

Universidade de São Paulo

Resumo

Apresentamos a Via Láctea, nossa Galáxia, primeiro com uma introdução de como a vemos no céu, e a seguir com a história dos primeiros passos de descobertas, que levaram a conclusão de que a Galáxia não é o próprio Universo, mas apenas uma entre muitas galáxias. Descrevemos seus componentes principais (disco galáctico, braços espirais, bojo, barra), mencionando suas dimensões e formas geométricas. Focalizamos as órbitas das estrelas, responsáveis pela manutenção da forma dos componentes. Explicamos as órbitas, a partir das forças gravitacionais que atuam sobre as estrelas.

Abstract

We present the Milky Way, our Galaxy, first with an introduction of how we see it in the sky, and then with the history of the first steps of discovery, which led to the conclusion that the Galaxy is not the Universe itself, but just one among many galaxies. We describe its main components (galactic disk, spiral arms, bulge, bar), mentioning their dimensions and geometric shapes. We focus on the orbits of the stars, responsible for maintaining the shape of the components. We explain orbits based on the gravitational forces that act on stars.

Palavras-chave: Via Láctea, estrutura da Galáxia, dinâmica da Galáxia.

Keywords: Milky Way, structure of the Galaxy, dynamics of the Galaxy.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43824](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43824)

1 Introdução

Desde tempos imemoriais, os homens dedicaram parte de seu tempo a admirar o céu, que era lindo, sem poluição nem luzes elétricas. Vamos brevemente descrever o que se vê no céu. Se veem estrelas, das mais brilhantes até as mais fracas, e direções nas quais existem agrupamentos estrelas que parecem formar figuras, extensas ou não, as “constelações”. Estas figuras, por serem facilmente reconhecíveis, são usadas como pontos de referência para encontrar outras constelações, ou explicar onde se encontra um objeto de interesse, como a Lua ou um planeta, num dado dia. As constelações são constituídas de estrelas que podem estar a distâncias físicas muito distintasumas das outras, estando apenas “projetadas” no céu a distâncias angulares relativamente pequenas. Os povos da antiguidade deram nomes às constelações, que muitas vezes lembram a forma de um animal, como a constelação do Escorpião, constelação do Cão Menor, etc. Parte dos nomes de constelações que utilizamos hoje nos provêm do grego. Parte das constelações do

hemisfério Sul, que não eram visíveis da Europa, tiveram nomes atribuídos pelos navegadores que primeiro se aventuraram no mares do Sul (Cruzeiro do Sul, Vela, Carina). Povos situados em outros continentes, ou sem contacto com a civilização europeia, criaram suas próprias denominações de constelações, identificadas com outros objetos, animais ou outras divindades.

Além das constelações, uma grande estrutura em forma de faixa bastante alongada, mas com contornos não bem definidos, nos aparece no céu (Figura 1). Na parte central da faixa a cor parece esbranquiçada. Os gregos associaram essa cor esbranquiçada a leite derramado, criando também um mito para explicar a presença deste leite, que teria sido derramado por uma divindade que estava amamentando. Leite em grego é “galactos”, até hoje. Essa é a origem da palavra Galáxia, objetos galácticos etc. Via Láctea é um sinônimo, mais claro para nós, e que preserva o significado original.

Hoje sabemos que as regiões esbranquiçadas são devidas a uma quantidade enorme de estrelas



Figura 1: Na foto da Via Láctea é possível ver do lado esquerdo duas manchas azuladas situadas fora da linha do disco galáctico; são as Nuvens de Magalhães. A inclinação da Galáxia no céu depende da hora da observação; ela parece girar no céu, quando na realidade é a Terra que gira. Em condições normais, mesmo com céu limpo, a Via Láctea não nos aparece tão clara como na foto. Contribui para isso o fato da máquina fotográfica utilizada na foto ser de grande angular, e o tempo de exposição longo, e a ausência de poluição luminosa.

situadas a grande distância, de tal forma que não conseguimos distinguir as estrelas (estrelas não resolvidas), mas percebemos a luz somada delas. O olho humano não possui a resolução para distinguir essas estrelas, mas com um telescópio de bom tamanho, conseguimos vê-las separadamente. Durante séculos, desde os gregos, a nome Galáxia foi atribuído a essa faixa de luz com manchas esbranquiçadas.

É de grande interesse entender como o significado de “Galáxia” mudou no século passado, porque essa é a própria história da abordagem científica das observações de estrelas em seu conjunto.

Relatamos, a seguir, de forma resumida, os principais passos dessa evolução.

Em 1785, William Herschel, músico e astrônomo alemão que vivia na Inglaterra, fez um primeiro “modelo do Universo”, que foi um passo inicial para poder entender, mais de um século depois, a estrutura da Galáxia. Herschel construiu seu próprio grande telescópio, financiado pelo Rei da Inglaterra George III, com espelho metálico polido de 1,2m de diâmetro, e um tubo do telescópio de 12 m de comprimento. Uma grande estrutura de madeira permitia movimentar o telescópio em torno de dois eixos, de azimute e de elevação, e permitia ao observador subir até o foco da imagem produzida pelo espelho, na entrada do tubo de 12m. Herschel estabeleceu um programa sistemático de observações do céu, com

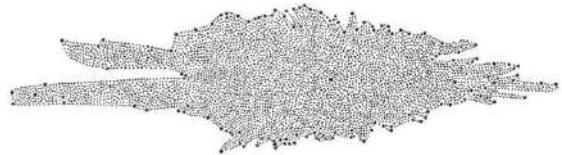


Figura 2: O Universo segundo William Herschel.

o objetivo de contar o número de estrelas que apareciam no campo de visão de seu telescópio, nas direções apontadas. Para a execução deste programa, ele contou com a ajuda de sua irmã Caroline Herschel. Para a interpretação dos dados, depois de acumulados durante anos, Herschel considerou que, em qualquer direção, ele estava observando era o Universo até sua fronteira final, a partir da qual só existia o vazio completo. Para estimar a distância dessa fronteira, considerou que a densidade de estrelas era homogênea em todos os lugares, com o mesmo número de estrelas por unidade de volume, e que nas fronteiras do universo a densidade de estrelas caía a zero abruptamente. Outra hipótese importante foi que todas as estrelas do universo são visíveis; nenhuma estrela podia escapar da detecção por ser distante ou fraca (suposição obviamente errada).

Assim, se numa dada direção era possível contar, dentro do campo de visão de seu telescópio, uma quantidade maior de estrelas, do que em outras direções, era porque a fronteira do Universo era mais distante nessa direção. Menos estrelas apareciam em direções onde o fim do Universo era mais próximo

O resultado de suas observações foi esquematizado como na Figura 2.

Esse resultado tem bastante mérito, por ser o primeiro modelo científico do “Universo”. Naquela época era impossível pensar que houvesse alguma coisa além do Universo e não se sabia que existe poeira interestelar que absorve a luz das estrelas. Por isso, o Sol foi colocado bem perto do centro do Universo, porque na realidade o que estamos vendo não é a fronteira da Galáxia, mas a distância até a qual se poderia contar as estrelas, determinada pela absorção da luz pelo meio interestelar. E a Galáxia não tem um fim abrupto (no modelo de Herschel, até a fronteira existem estrelas, depois não há mais nenhuma). O modelo de Herschel foi usado e melhorado ao longo de mais de um século. O astrônomo holandês Ja-

cob Kapteyn, realizou observações de movimentos próprios de estrelas (deslocamento das estrelas no céu). Em 1901, Kaptein, baseado nessa técnica, estabeleceu uma dependência da distância das estrelas com a magnitude (ou brilho). Concluiu que a Galáxia era um objeto oblato, com 10 kpc de largura e 2 kpc de espessura, com o Sol próximo do centro, a 6 kpc (essas unidades são explicadas mais adiante). O modelo de Kapteyn teve em comum com o de Herschel o fato da Galáxia e do Universo serem uma coisa só.

Voltando um pouco na história, no século XVIII, Charles Messier, astrônomo francês que fazia levantamentos de possíveis cometas, fez também levantamento de pequenas nebulosas, algumas delas com formato espiralado. Ele pensou, naturalmente, que as nebulosas estavam situadas em distâncias pequenas. Catalogou essas nebulosas, denominando-as com a letra M de seu próprio nome, seguida de um número. Esse catálogo sobrevive até hoje, pois contém objetos de grande interesse. Entre esses objetos, M31 é um dos mais brilhantes, e voltaremos a mencioná-lo. No entanto, a natureza desses objetos e suas distâncias só foram estabelecidos vários séculos depois da confecção desse catálogo. Voltamos, então, ao curso da história pós-Messier e pós-Herschel.

Em 1923, Edwin Hubble, astrônomo que trabalhava nos Estados Unidos e teve acesso ao maior e melhor telescópio existente, o telescópio do Monte Wilson, na Califórnia, com o qual fez uma descoberta fundamental, que revolucionou a Astronomia. O telescópio do Monte Wilson, com 2,5 metros de diâmetro, foi instalado em 1917 e permaneceu o maior do mundo até 1949. Hubble mostrou que uma nebulosa brilhante bastante conhecida, M31, ou nebulosa de Andrômeda (por estar na constelação de Andrômeda), estava a uma distância muito maior do que se pensava.

É importante descrevermos com algum detalhe como ocorreu essa descoberta, que deu início a toda a escala de dimensões da Galáxia e do Universo. Essa descoberta é esclarecedora de como a pesquisa astronômica se desenvolvia, com uma descoberta se tornando um degrau para outra imediatamente posterior.

O feito de Hubble foi conseguido graças a observações e estudos anteriores de estrelas Cefeidas, conduzidas por Henrietta Leavitt, que foi estagiária do Observatório de Harvard. As Cefeidas

são estrelas variáveis regulares, com período de variação do brilho (intervalo de tempo entre dois máximos de brilho sucessivos) de poucos até dezenas de dias. Observando Cefeidas que provavelmente estavam a uma mesma distância, por estarem agrupadas (por exemplo, nas Nuvens de Magalhães), verificou-se que as estrelas mais brilhantes tinham um período maior. Assim, nasceu a relação linear período-luminosidade das Cefeidas, publicada em 1912 por Leavitt. Cabia ainda estabelecer as luminosidades expressas em magnitudes absolutas, em vez de aparentes, como inicialmente medidas por Leavitt. O conceito de aparente e absoluto é explicado a seguir

O brilho é uma avaliação da intensidade da radiação que nos chega, com caráter qualitativo e definição vaga. Os astrônomos profissionais preferem usar a definição mais rigorosa de magnitude,

A mesma grandeza de radiação (ou fluxo de energia recebida) poderia ser expressa em termos de brilho ou de magnitude. Em geral, os astrônomos profissionais preferem usar a escala de magnitude, que é uma escala logarítmica, por razões históricas e razões de praticidade. Para comparar a real natureza de estrelas é necessário se livrar do efeito da distância, calculando qual seria sua magnitude se elas fossem todas colocadas a uma mesma distância padrão, como por ex. 10 pc. Essa é a “magnitude absoluta”. Sabendo a magnitude absoluta e a magnitude observada, podemos calcular a distância.

Inicialmente, Leavitt comparou estrelas que considerou estarem a uma mesma distância, por estarem ligadas a um mesmo objeto (Nuvem de Magalhães) mas não sabia qual era essa distância. Sabia as magnitudes aparentes, mas não sabia as magnitudes absolutas. No final Leavitt encontrou algumas Cefeidas a pouca distância do Sol, cuja distância pode ser medida pelo método de paralaxe. Assim, a relação período-luminosidade evoluiu para uma relação período – magnitude absoluta.

Hubble, ao observar a Nebulosa de Andrômeda (M31) com o telescópio do Monte Wilson, reconheceu a existência de Cefeidas por seus períodos característicos, apesar das estrelas serem bastante mais fracas que as Cefeidas próximas. Fazendo uso da relação período-magnitude absoluta, calculou a distância da nebulosa de Andrômeda, e verificou que esta estava muito além do per-

mitido pelas fronteiras do Universo de Herschel. Rompeu-se, assim, o conceito de que o Universo de Herschel, assim como o de Kapteyn, representavam o verdadeiro Universo. Em poucos anos, percebeu-se que não apenas M31, mas muitas outras nebulosas do catálogo de Messier também estavam a grandes distâncias.

Concluiu-se que o Universo de Herschel é apenas uma grande estrutura local, que hoje chamamos de “a Galáxia”, e que o verdadeiro Universo contém muitas outras galáxias (com “g” minúsculo), assim chamadas por terem semelhança com nossa Galáxia.

Tendo apresentado, nesta Introdução, nossa Galáxia partindo de nosso primeiro contato visual, e a história das descobertas iniciais, temos que decidir como prosseguir. Seria interessante varrer um grande número de tópicos: como morfologia da Galáxia, sua composição estelar (distribuição de massas, temperaturas, luminosidades, idades, abundâncias químicas das estrelas), o meio interestelar, e a história da Galáxia no contexto cosmológico. Enfim, toda a Astrofísica se encontra na Galáxia. Diante dessa missão impossível, nossa opção será de nos restringir a algumas questões muito específicas da Galáxia: dimensões dos grandes componentes, curva de rotação, braços espirais, a ressonância de co-rotação, correntes estelares. Abordaremos também a matéria escura, dentro do contexto galáctico.

2 As outras galáxias

A conclusão de que existem muitas outras galáxias, foi de grande ajuda para conhecermos melhor nossa própria Galáxia. Há uma grande variedade de formas de galáxias, e inclusive, podemos dizer que não existem duas iguais. Mas mesmo sendo diferentes entre si, podemos reconhecer alguns elementos básicos em comum. Várias galáxias apresentam um halo, um bojo, um disco, uma barra, e braços espirais. Nem todas as galáxias apresentam todos esses componentes, mas a nossa os tem. Discutiremos suas formas e dimensões.

Edwin Hubble, que contribuiu para estabelecer o conceito de galáxias, como vimos, propôs uma forma de classificá-las, que apresentamos na Figura 3. Do lado esquerdo ficam as galáxias “elípticas”

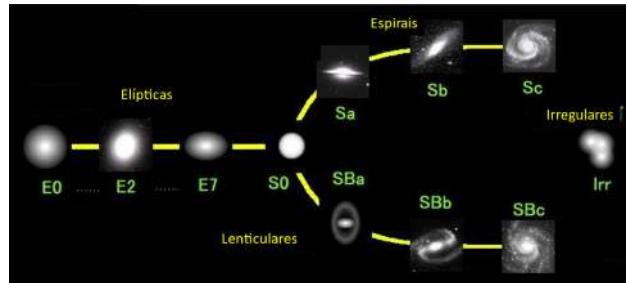


Figura 3: A classificação de galáxias de Hubble.

“elípticas” e do lado direito as espirais, divididas em dois ramos, as espirais sem barra (ramo superior), e as com barra (ramo inferior). Nossa Galáxia se aproxima do tipo Sc, sem barra, embora mais adiante mencionaremos a existência de uma barra, ainda que pequena. A classificação de galáxias por Hubble é apenas uma das várias classificações propostas até hoje, mas teve o mérito de ser a primeira.

3 Os componentes da galáxia

Descreveremos as formas e as dimensões dos componentes de nossa Galáxia que foram estabelecidas por meio de observações e de modelos. Não daremos mais tanta ênfase histórica (quem descobriu o que) com algumas exceções. Entre os componentes, dedicaremos mais espaço ao disco galáctico do que aos outros, porque ele apresenta uma física mais variada e interessante, e temos informações mais precisas sobre ele, porque é nele que residimos.

3.1 O disco galáctico

Utilizamos, em nossas descrições, distâncias em parsecs (pc) unidade introduzida por astrônomos da área de astrometria, que medem distâncias de estrelas pelo método da paralaxe (medida da amplitude dos pequenos movimentos oscilatórios das estrelas, com período anual). Um parsec é a distância que corresponde a uma paralaxe de 1 segundo de arco, e é aproximadamente 3×10^{13} km. Utilizaremos também o kpc, (mil parsecs). Em muitos textos encontramos distâncias em anos-luz, o que parece mais intuitivo (a distância percorrida pela luz em 1 ano), embora não tenhamos como medir distâncias, observationalmente,



Figura 4: Imagem da Galáxia num eixo de latitude (eixo vertical) e longitude (eixo horizontal. A imagem é construída utilizando os dados de levantamento feito no infravermelho próximo (missão espacial IRAS).

a partir de sua definição, ao contrário do parsec. Um parsec é igual a 3,26 anos-luz.

3.1.1 Descrição geral

O disco é uma estrutura que se parece, em termos de forma, com os discos de vinil ou os CDs de computadores; com espessura fina em comparação com o raio. A espessura é da ordem de 200 pc, enquanto o diâmetro é da ordem de 20 kpc, (uma razão de 100). Na realidade, tanto a espessura quanto o raio não possuem dimensões claramente definidas, porque a densidade de estrelas vai diminuindo gradativamente nessas duas direções (perpendicular ao disco, e ao longo do disco), e não há um fim brusco. A função exponencial, do tipo $\rho(z) = \rho(0)e^{-z/h}$, representa bem essa variação, onde z representa a altura (ou distância) ao plano central do disco e h é a escala de altura. Uma pequena complicação é que existem duas “populações” de estrelas, com idades de estrelas distintas e com escalas de altura distintas: o disco “fino” e o disco “espesso” são distinguíveis porque as estrelas do disco fino são mais jovens que as do disco espesso. O leitor que não tiver familiaridade com a função exponenciais poderá “pular” as próximas linhas, sem muito prejuízo. A densidade total é então uma soma:

$$\rho(z) = \rho_f(0)e^{-z/h_f} + \rho_e(0)e^{-z/h_e}, \quad (1)$$

onde $\rho_f(0)$ e h_f representam respectivamente a densidade no plano e a escala de altura do disco fino, e $\rho_e(0)$ e h_e os mesmos parâmetros para o disco espesso. Há muitas estimativas na literatura, e geralmente se considera que $h_f = 100$ pc e $h_e = 150$ pc. A densidade do disco fino é bastante maior que a do disco espesso, contendo 85% do total de estrelas no disco. Note que “escala de altura” e “espessura” são conceitos distintos, porque a espessura conta as duas faces do disco.



Figura 5: ;Galáxia “warped” vista pela borda, ESO 510-G13. Pode ser vista a luminosidade da região central do halo.

O Sol é uma estrela comum, situada no meio da espessura do disco. É uma estrela típica do disco fino. Devido a essa posição, no disco, não enxergamos este componente em sua totalidade, como aconteceria se o Sol estivesse a uma grande altura com relação ao disco.

O disco nos aparece como a faixa com grande densidade de estrelas, atravessando o céu (é a Galáxia da antiguidade). Utilizando dados da região espectral do infravermelho, por exemplo em 2,2 mícrons de comprimento de onda, na qual a absorção da luz pela poeira interestelar é bem menor que no visível, enxergamos mais longe. Percebemos melhor neste caso que o disco é uma estrutura com espessura pequena (Figura 4).

3.1.2 O warp ou empenamento do disco galáctico

O disco não é 100% plano. É parecido com um chapéu, com uma aba inclinada para baixo, e do lado oposto, para cima. Essa deformação é chamada de “warp”, termo inglês que significa empenamento. O Sol está no disco a 8,5 kpc do centro. Até essa distância, o warp não é perceptível, mas a maiores distâncias do centro (a 12 kpc, aproximadamente) ele começa a se manifestar. Um exemplo de galáxia com warp, vista pela borda, é mostrado na Figura 5. Mapeamentos na linha de 21cm (explicada mais adiante) mostram que o desvio do disco com respeito a um plano perfeito é da ordem de 1 kpc, na direção de maior empenamento, a uma distância de 15 kpc do centro. É um empenamento bastante modesto. Quem desejar ver mais detalhes a respeito, para nossa galáxia, pode consultar por exemplo o artigo de revisão de Kaberla e Kerp (2009).

3.1.3 As órbitas das estrelas, no disco (primeira parte)

As órbitas das estrelas podem ser estudadas se tivermos conhecimento das forças que atuam sobre elas. No plano do disco, em particular, esse conhecimento nos vem da “curva de rotação”. Nossa roteiro será de ida e volta. Os fundamentos das órbitas estelares serão brevemente abordados, e depois explicaremos a curva de rotação e como ela é obtida. Voltaremos a uma discussão das órbitas, considerando as implicações da curva de rotação. Na primeira fase dessa discussão, suparemos que as nuvens de gás se comportam como as estrelas.

Para entender por que o disco é uma estrutura estável, um ponto importante a ser sempre lembrado é que as estrelas nunca colidem. Mesmo com uma densidade estelar relativamente alta, como no disco, as estrelas são tão distantes entre si, e tão pequenas, comparando com suas distâncias médias, que as colisões são raríssimas. Exceções a essa regra podem ocorrer se elas estiverem aprisionadas em um objeto com densidades estelares muito altas, como um aglomerado globular.

Como as estrelas não colidem, as únicas forças que conseguem atuar sobre elas são as forças gravitacionais globais, provenientes de grandes conjuntos de estrelas, como as do bojo e do disco. Por esse motivo, as órbitas não apresentam variações bruscas de direção, sendo curvas suaves.

Faremos uma comparação com o sistema solar. Os planetas, como as estrelas, não colidem entre si, e a força dominante que age sobre eles é a atração gravitacional do Sol. As órbitas resultantes são elípticas, com o Sol em um dos focos da elipse (lei de Kepler). No caso das órbitas circulares, a velocidade dos planetas ao longo da órbita é dada pela equação $V = (MG/r)^{1/2}$, onde V é a velocidade orbital, M a massa do Sol, G a constante gravitacional, e r o raio da órbita. A explicação desta fórmula é a seguinte. A força de repulsão centrifuga que atua sobre um planeta devido ao movimento em órbita circular é mV^2/r , e a força de atração gravitacional é GMm/r^2 , onde m é a massa do planeta. O planeta se mantém em órbita aproximadamente circular porque a força de atração e a de repulsão se equilibram. Igualando as duas expressões das forças, obtemos a expressão mais acima (a massa do planeta foi eli-

minada, por aparecer dos dois lados da equação). Por semelhança com o problema de um planeta, podemos afirmar que as velocidades das estrelas em suas órbitas em torno do centro galáctico dependem da massa central e do raio da órbita, mas não da massa das estrelas. Por isso faz sentido atribuir uma velocidade de rotação média a uma região da Galáxia: não há estrelas mais rápidas e outras mais lentas, com raras exceções.

Continuando com a comparação das órbitas de estrelas em torno do centro da Galáxia com as de planetas em torno do Sol, a maior diferença entre esses dois tipos de órbitas provém do fato que a massa que produz a força de atração para o centro da Galáxia varia com o raio galáctico. O Sol tem massa constante, enquanto o “centro da galáxia” tem uma massa que depende do volume considerado. À medida que nos afastamos do centro, o volume que temos que levar em consideração na região central aumenta, o número de estrelas contidas nesse volume aumenta, logo a massa total do conjunto aumenta.

Adotando uma aproximação razoável, colocando-nos numa distância r do centro, podemos considerar que apenas as estrelas contidas no interior do volume esférico de raio r contribuem para a atração gravitacional. As estrelas situadas fora dessa esfera não contribuem. Como varia, então, a velocidade orbital, em função do raio? No caso dos planetas e supondo que eles estão em órbitas praticamente circulares, a lei é $V = (MG/r)^{1/2}$, como já vimos. Ou seja, a dependência de V em r é do tipo $r^{-1/2}$. Para as estrelas do disco, M em nossa última equação não representa mais a massa do Sol, mas a massa total das estrelas dentro da esfera de raio r . M depende de r , $M(r)$ crescendo junto com r . A velocidade dada por nossa fórmula, portanto, cai menos abruptamente que $r^{-1/2}$; ela pode ser constante ou mesmo aumentar. No entanto, o crescimento de M com r não pode seguir por longas distâncias, porque sabemos, por meio das pesquisas de contagens de estrelas, que a densidade de estrelas decresce exponencialmente, dentro do disco, em função da distância ao centro; chega um valor de r para o qual $M(r)$ é constante, daí para a frente.

A lei de densidade em função do raio do disco é difícil de ser observada em nossa Galáxia, devido ao obscurecimento pela poeira e às grandes dis-

tâncias percorridas pela luz dentro do disco. Essa lei é mais bem observada em outras galáxias.

Antes de tentar se aprofundar nessa questão, para termos alguns números em mãos, temos que apresentar mais detalhadamente a curva de rotação de nossa e de outras galáxias.

3.1.4 A curva de rotação do disco

A curva de rotação, gráfico da velocidade de rotação das estrelas (ou do gás interestelar) no disco em função da distância ao centro, é um dos conjuntos de dados mais importantes para entender a estrutura de nossa Galáxia, e de outras galáxias.

Essa curva só pode ser obtida, de forma confiável, por meio de observações diretas, e não por meio de modelos, que eventualmente não contabilizam corretamente todas as formas possíveis de matéria, e dependem de muitos parâmetros desconhecidos. Então, observamos a curva de rotação e tentamos deduzir, a partir desta curva, que representa a realidade objetiva, a densidade de matéria (soma de todas as formas de matéria) existente no disco, e demais parâmetros, em função do raio.

- Linha de 21 cm.

Historicamente, as primeiras medidas da curva de rotação da galáxia foram feitas através de observações em frequência de rádio, que apresentam a vantagem de praticamente não serem absorvidas pela poeira. Na década de 1950 foi descoberta a linha de 21 cm de comprimento de onda, ou frequência de 1420,4 MHz, do hidrogênio neutro H (distinto da molécula H₂). A existência de dois níveis de energia no átomo de H, está relacionada com a orientação do spin do elétron em relação ao spin do próton do átomo H.

O resultado direto de uma observação, com um radiotelescópio funcionando em 21 cm apontado para uma direção no céu, fixada em ascensão reta e declinação, é um espectro. Este é um gráfico da intensidade da radiação recebida em função da frequência. Cada pequeno trecho da linha de visada, em seu referencial, emite na mesma frequência de radiação de H, 1424,4 MHz. No entanto, a radiação de um trecho, ao alcançar o radiotelescópio, não está mais na frequência ori-

ginal, devido ao efeito Doppler. Há uma relação direta entre a frequência recebida de um trecho com a velocidade com a qual o gás está se afastando ou aproximando do observatório. Assim, o eixo de frequência pode ser considerado como um eixo de velocidade. O eixo de intensidade de radiação é diretamente medido em volts na saída do receptor, mas pode ser “calibrado” por meio de comparação com a radiação de corpo negro de objetos a diferentes temperaturas, e ser apresentado em unidades de temperatura.

Num espectro, não temos a informação da distância dos trechos de gás ao longo da linha de visada. Mas pelo menos para um ponto do espectro, conseguimos descobrir onde se situa a o gás que está emitindo. É o ponto na linha de visada situado o mais próximo do centro do disco (ou centro da Galáxia). Nesse ponto a velocidade de rotação, vista como um vetor (uma flecha) se encontra totalmente orientada na direção do observador e o efeito Doppler será máximo. Esse ponto recebeu um nome (ponto subcentral).

Observando em diferentes longitudes galáctica, e calculando a cada vez a posição do ponto subcentral, obtemos pares de raio-galáctico-velocidade.

Um gráfico destes pontos descreve a velocidade de rotação em função do raio galáctico; é o que chamamos de curva de rotação. Essa curva descreve como varia a velocidade de rotação em função do raio galáctico

- Linha de CO.

Esse método de obtenção da curva de rotação, que parece um pouco complicado e trabalhoso (porque exigia a obtenção de muitos espectros) era o único de que se dispunha na década de 70. A observação de estrelas a grande distância não era possível. Na década de 80 surgiu uma melhoria, que foi o uso de uma linha espectral da molécula CO, em 115 GHz ou 2,6 mm, que substituiu a linha de 21 cm. Trabalhando com frequências mais altas, os radiotelescópios tinham resolução angular melhor e a obtenção de espectros estava livre das interferências radioelétricas produzidas pela atividade humana. Levan-

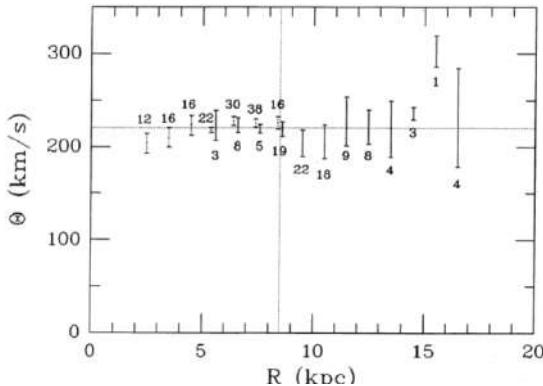


Figura 6: Curva de rotação de Fich et al., composta com dados de HI, de CO, e de regiões HII para os pontos mais externos.

tamentos bastante citados usando CO foram publicados por D. Clemens em 1985 [1] e por Fich et al em 1989 [2]. Ambos fizeram uso de metodologias semelhantes entre si e com os levantamentos em 21 cm, fazendo uso dos pontos subcentrais. Note-se que a metodologia dos pontos subcentrais não permite ir além de 8.5 kpc, porque não existe esse ponto além da órbita solar.

Outros métodos foram utilizados por Clemens e por Fich et al., fazendo uso de regiões HII (esferas de hidrogênio ionizado) para ir além desse raio. Mostramos na Figura 6 a curva obtida por Fich et al.

O resultado interessante e incontestável é que a curva de rotação é bastante plana, com valor de 220 km/s entre aproximadamente 3 kpc do centro até cerca de 15 kpc.

Recentemente, resultados totalmente novos sobre a curva de rotação foram obtidos a partir dos dados da missão espacial Gaia, que mediou os movimentos próprios de estrelas com boa precisão até uma distância de cerca de 8 kpc do Sol, mas alcançando raios galáticos até 18 kpc, com menor precisão. São medidas diretas da velocidade e da distância, que não dependem da teoria dos pontos subcentrais. Esses dados recentes, apresentados na Figura 7, confirmam e estendem a curva de rotação obtida anteriormente pelos radioastrônomos, mas agora com barras de erro menores.

Podemos constatar que a curva de rotação é surpreendentemente plana se olharmos bem no centro do disco ($z=0$), região para a qual as bar-

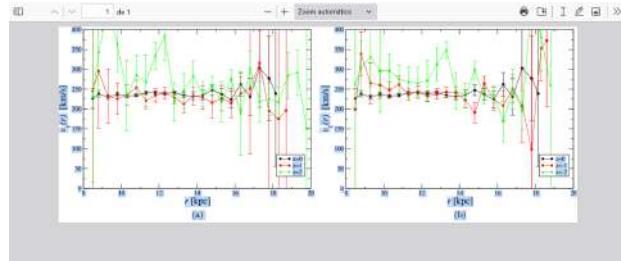


Figura 7: Resultados do levantamento Gaia para a curva de rotação. Para nossos efeitos, só interessam os dados para $z = 0$ (linha preta) que corresponde a observações exatamente no meio do disco galáctico (em altura), e apresentam barra de erros menores. Publicado por Chrobakova et al (2020).

ras de erro na velocidade são muito pequenas, até uma distância ao centro de 14 kpc, pelo menos. A curva parece ser plana até 18 kpc, mas depois de 16 kpc a qualidade dos dados piora. Os dados de Gaia apresentados por Chrobakova et al (2020) [3] são apresentados para 3 valores da latitude galáctica e só discutiremos os dados para $z = 0$ (dentro do plano). De acordo com o modelo de rotação do disco galáctico que discutimos anteriormente, o fato da curva ser plana só pode acontecer se a densidade de estrelas cai precisamente de forma a compensar a lei de r^{-1} da teoria mais simples.

Um grande problema nos espera. As curvas de rotação das galáxias, e não só da nossa, que são o gráfico da velocidade do material do disco em função da distância ao centro, foram medidas, e apresentam-se planas, em sua grande maioria. A ausência de queda da velocidade de rotação a grandes distâncias, em princípio, indicaria que $M(r)$ ainda não terminou de crescer, a grandes distâncias do centro. No entanto, os programas de contagem de estrelas indicam, a existência de uma queda exponencial de contagens de estrelas, em função dos raios galáticos. Esta contradição levou à sugestão de que existe uma forma de matéria que não é detectável por nossos instrumentos, a matéria escura. Uma pergunta de leigos nos vem à cabeça: como assim, não há mais matéria, se estamos conseguindo medir a curva de rotação por meio de radioastronomia, para o gás, ou dos dados de GAIA para as estrelas? A resposta teria que ser quantitativa: de fato, existe matéria visível, a grandes distâncias, mas não em quantidade suficiente para explicar uma curva plana. Voltaremos a questão da matéria escura no final

do texto.

3.2 Braços espirais.

Segundo a classificação de Hubble, as galáxias que possuem discos extensos apresentam também braços espirais, independentemente de terem barra ou não. Os braços são considerados como ondas de densidade, regiões onde a densidade de gás é maior, o que estimula a formação de estrelas, já que estas são o resultado de colapso gravitacional de nuvens de gás. Chegamos ao ponto de acreditar que as estrelas só nascem no interior de braços, não havendo formação estelar nas regiões inter-braços. Tampouco nascem estrelas no bojo ou no halo.

Como sabemos onde estão os braços? As estrelas massivas, com uma dezena de massas solares ou mais, são muito luminosas, e têm vida curta, da ordem de 15 milhões de anos. Esses números, um pouco imprecisos, nos vêm dos estudos de evolução estelar, que envolvem as taxas de reações nucleares no centro das estrelas. Não discutiremos aqui as questões de evolução estelar.

O tempo de vida muito curto faz com que as estrelas massivas não tenham tempo de se afastar do centro do braço no qual nasceram, antes de desaparecer. Estão, praticamente, onde nasceram. Ao mesmo tempo, a luminosidade elevada dessas estrelas faz com que possam ser observadas a grande distância. Estas duas propriedades, em conjunto, tornam as estrelas massivas os objetos ideais para traçar os braços. Apresentamos nas Figura 8 os mapas dos braços espirais da Galáxia, publicados por Mark Reid e colaboradores.

É impressionante como a forma espiral é bem traçada e regular. O “*pitch angle*” de um braço (ângulo com o qual a espiral corta qualquer círculo com centro no núcleo galáctico, e que descreve a “abertura” dos braços), é tipicamente 7 graus para os vários braços apresentados. Cada galáxia tem seu “*pitch angle*” dominante.

3.2.1 O dilema do enrolamento

Os braços são, portanto, regiões com excesso de estrelas massivas e de gás interestelar (o que permite formar novas estrelas). Podemos nos perguntar como os braços sobrevivem com uma curva de rotação, que apresenta velocidade praticamente constante com o raio. Com velocidade

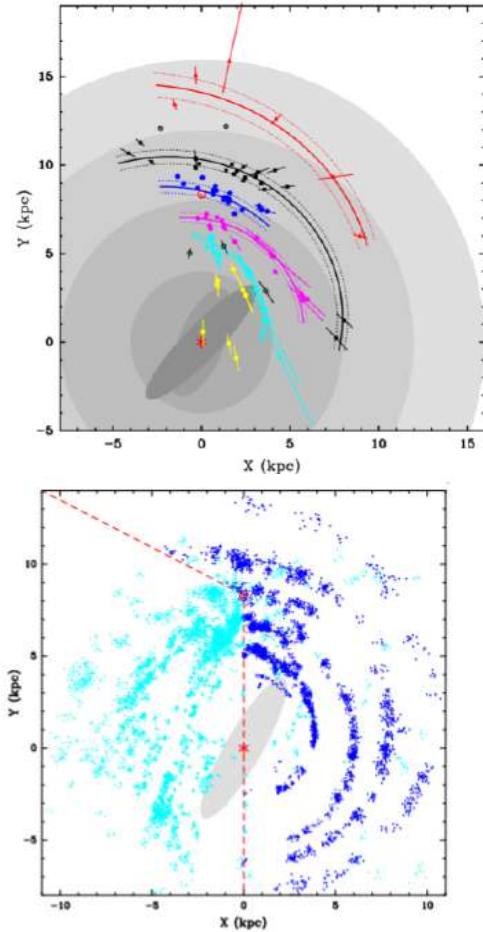


Figura 8: Mapas dos braços espirais da Galáxia apresentados por Mark Reid e colaboradores em 2 artigos distintos. Os traçadores de braços são *masers* de água e de metanol, regiões HII e fontes MSX vermelhas. Como os *surveys* (levantamentos) foram realizados principalmente a partir do hemisfério norte há, uma deficiência de dados para as longitudes galácticas negativas, nos trabalhos de Reid et al. Mas tais dados existem.

constante, um ponto do braço situado a 10 kpc do centro (por exemplo) as estrelas demoram o dobro do tempo para dar a volta da Galáxia do que um ponto a 5 kpc. Portanto, os braços deveriam ficar cada vez mais “enrolados”, com as partes internas dando mais voltas do que as partes externas, por unidade de tempo. Esse é “o dilema do enrolamento”, para o qual existe uma solução. Para explicá-la vamos descrever melhor as órbitas estelares.

3.2.2 Traçando órbitas - “integração” de órbitas

Para traçar a órbita de uma estrela no plano galáctico, utilizamos um método matemático que

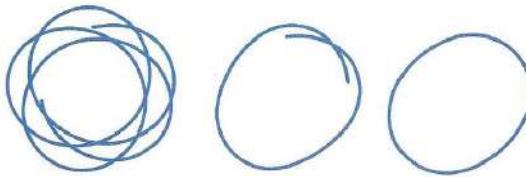


Figura 9: Órbita estelar típica no disco da Galáxia.

chamamos de integração, sem relação com a integração de funções. Tomemos uma estrela para a qual foi medida a velocidade nas duas direções, radial e longitudinal (em coordenadas galácticas). Temos, portanto, o vetor velocidade completo (não vamos nos preocupar com a direção perpendicular ao plano). No instante t_1 temos a posição P_1 e a velocidade V_1 (são vetores porque estamos trabalhando com as duas componentes, radial e longitudinal, dessas grandezas) No instante $t_2 = t_1 + dt$, onde dt é um intervalo de tempo pequeno, a nova posição será $P_2 = P_1 + V_1 dt$. Como os números do lado direito da equação são conhecidos P_2 é obtido facilmente. Para estabelecer a nova velocidade V_2 , devemos relacionar a mudança de velocidade ($a \times dt$ onde a é a aceleração) às forças que atuam sobre a estrela, que são a atração gravitacional do centro da galáxia e a força centrifuga. Temos $V_2 = V_1 + adt$. Obtidos P_2 e V_2 , usamos o mesmo procedimento para obter P_3 e V_3 , e assim sucessivamente.

Notemos que o vetor aceleração possui componente longitudinal nula, pois as forças que mencionamos só atuam na direção radial. E, novamente, embora as forças dependam de m (massa da estrela), as acelerações, não. Mas só as acelerações entram nas equações da integração. Em consequência a trajetória obtida não depende da massa da estrela.

Mostramos na Figura 9 uma órbita típica de uma estrela do disco, integrada ao longo de um tempo suficiente para dar várias voltas (9-a), e no centro (9-b) mostramos apenas 1 volta .

Essa órbita pode ser entendida como a soma de um movimento circular com uma oscilação em torno do raio dessa órbita. Se a estrela foi deslocada para raios maiores que a órbita de equilíbrio, sem alterar sua velocidade longitudinal, a velocidade ficará menor devido a lei de conservação de momento angular ($L = R \times V = \text{constante}$) Por outro lado, se V diminui, a força centrifuga

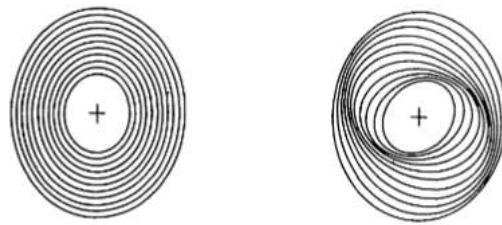


Figura 10: Explicação simples de como a precessão das órbitas produz uma estrutura espiral (Kalnajs, 1973).

mv^2/r , que depende de V , também diminui. As duas forças, força centrifuga e força de atração do centro galáctico, que estavam em equilíbrio numa órbita circular, deixaram de estar em equilíbrio, e a atração gravitacional passou a dominar. A estrela cai em direção ao centro galáctico. Nessa queda, a estrela atravessa o círculo da órbita não perturbada, em seu caminho para o centro. A conservação do momento angular aumenta novamente a velocidade. Essa sequência não tem fim, e parece com o problema de uma mola com um peso, na qual aplicamos um deslocamento. A mola volta para seu lugar, mas ultrapassa o ponto de equilíbrio, vai até o extremo do outro lado, passando a oscilar em torno do ponto de equilíbrio. No caso da estrela o ponto de equilíbrio é o raio da órbita circular de origem. Assim, com a aplicação de simples leis da mecânica clássica, conseguimos entender as órbitas que nos foram reveladas através da integração numérica; explicamos a Figura 9.

O que podemos dizer, sobre a frequência da oscilação? Examinando a Figura 9 podemos notar que o período da oscilação para dentro e para fora (denominada oscilação epicicloidal) quase coincide com o período orbital. Se o período dessa oscilação radial fosse um pouco maior, a trajetória demoraria um pouco mais para completar uma volta, e depois de uma volta a curva coincidiria em posição com o ciclo anterior. Nesse caso teríamos uma curva fechada, e a volta seguinte coincidiria exatamente com a que acaba de ser concluída. Essa seria uma situação ideal, com uma trajetória permanente.

Kalnajs (1973) [4] teve uma ideia que deu vida aos braços espirais. Gostaríamos de ter curvas fechadas, para ter um sistema totalmente estável. Vamos supor que enquanto estamos traçando uma órbita, giramos o papel lentamente, de forma

que depois de uma volta, a pequena rotação do papel faça com que a curva se tornasse fechada. Se continuarmos com a rotação do papel, depois dessa volta, a curva estaria de novo fechada.

Kalnajs desenhou uma série de órbitas elípticas com espaçamento igual, como na Figura 10 (esquerda). Em seguida aplicou uma pequena rotação a cada uma delas, sendo essa pequena rotação medida em relação à órbita anterior, como na Figura 9 (centro). Aparecem regiões onde as órbitas ficam mais próximas umas das outras, e as regiões com maior densidade de órbitas desenharam uma espiral, que lembra os braços espirais de uma galáxia. Esse exercício, que parece uma brincadeira, pode nos dar mais informações. Vemos acima que uma órbita elíptica aberta, pode ser vista como fechada, num determinado sistema de referência em rotação. O fechamento da órbita é atribuído a oscilação da estrela em torno de sua órbita estável (oscilação epicicloidal). Depois de alguma manipulação matemática, concluímos que se um dado momento as inclinações das elipses estão como na Figura 10 (direita), num momento seguinte todas elas terão girado de uma mesma quantidade, de tal forma que a figura espiral se mantém com o mesmo aspecto, girando com uma velocidade constante. Ou seja, a velocidade de rotação dos braços espirais, está ligada à frequência epicicloidal e à frequência orbital. Os braços são locais onde existe uma grande quantidade de órbitas, portanto maior concentração de massa, o que chega a caracterizá-los como poços de potencial de forma alongada. Ao mesmo tempo, o poço de potencial tende a atrair e fixar as órbitas, sincronizando-as, o que dá consistência e bom tempo de vida ao sistema todo.

Estamos convencidos de que essa é a única boa explicação para os braços espirais: são regiões de adensamento de órbitas estelares. Não fazem sentido modelos de braços em que estes se deslocam uns em relação aos outros ou se cruzam, como existem na literatura. Bifurcações de braços são razoavelmente comuns, mas a explicação em termos de dinâmica de órbitas, ainda não foi suficientemente estudada.

Na vizinhança imediata do Sol existe o braço local, que certamente se destaca por sua natureza que é distinta dos braços normais. Ele é bastante curto e possui ângulo de inclinação praticamente nulo. Esse braço é uma consequência da resso-

nância de co-rotação.

3.3 A ressonância de co-rotação, local privilegiado

Uma ressonância, em vários domínios da Física, é a forte amplitude de oscilação ou de vibração de um sistema, em resposta a duas frequências próximas ou coincidentes. Esse termo é usado às vezes quando uma das frequências é a "frequência natural" do sistema. Por exemplo ao projetar um equipamento mecânico vamos evitar que haja ressonância entre a frequência natural dessa estrutura e a frequência gerada por um motor integrado ao equipamento. Em mecânica celeste, o estudo das ressonâncias entre movimentos de planetas, seus satélites, e corpos celestes menores, é uma atividade preponderante,

Em nossa Galáxia, a ressonância de co-rotação de refere à coincidência entre a velocidade de rotação das estrelas do disco e a velocidade de rotação dos braços espirais. Vamos abordar diversos aspectos dessa ressonância. Sabemos que os braços espirais da Galáxia giram como um corpo rígido, com velocidade de rotação muito bem determinada, que estimamos em 28 km/s por kpc (Dias et al, 2000 [5]). A velocidade é proporcional ao raio, para um corpo rígido, por isso usamos a unidade de km/s por kpc, o que dá 232 km/s no raio 8.3 kpc. Por outro lado, as estrelas do disco galáctico giram em torno do centro galáctico com uma velocidade de 232 km/s, que é a mesma para qualquer raio. Este último valor é o que podemos verificar nas curvas de rotação das Figuras 6 e 7. Portanto reencontramos que a velocidade de uma estrela situada na co-rotação é zero, em relação aos braços espirais, como sabemos. Em consequência, uma estrela situada na ressonância de co-rotação nunca vai atravessar um braço espiral. Vamos agora examinar o caso de uma estrela que se encontre 100 pc apenas para o exterior do disco, no raio galáctico 8.4 kpc. A velocidade dos braços vai para $28 \times 8.4 = 235$ km/s, ou seja 3 km/s mais rápido que as estrelas que continuam em 232 km/s. O tempo para uma estrela para ir de um braço para o outro seria como se a estrela viajasse com 3 km/s. Para percorrer os 13,3 kpc que há entre um braço espiral e o próximo, com essa velocidade colocada em unidades de kpc/ano chegamos a um tempo

de 4,3 bilhões de anos. Vale a pena lembrar de um raciocínio feito pelo astrônomo soviético L.S. Marochnik em 1983 [6]. A primeira hipótese é que a vida tal como a conhecemos na Terra seria totalmente destruída se o Sol atravessasse um braço espiral. Num braço espiral há formação e explosão de estrelas massivas, supernovas e outras fontes de raios cósmicos e de raios X. Essas radiações têm condições de esterilizar completamente um planeta. A vida teria que recomeçar do zero, uma vez acabada a travessia. Os cálculos feitos por diversos autores que estudam fontes de radiação em nossa Galáxia corroboraram essa conclusão.

A segunda hipótese do Marochnik é que o aparecimento da vida num planeta, desde suas formas mais simples, contando sua evolução até chegar a vida inteligente é um processo que demanda aproximadamente 4,5 bilhões de anos. Como chegar a tal resultado? A única estrela que ele pode citar como exemplo é o Sol, com a vida na Terra, que muito provavelmente não existia em forma inteligente há 200 milhões de anos atrás. Talvez falte uma definição do que é vida inteligente, mas vamos prosseguir. Se estivéssemos numa órbita situada a apenas 100 pc da nossa, mais para fora ou para dentro com relação à órbita ressonante, já não teríamos existido, porque o tempo passado desde a última passagem num braço seria menor que 4,3 bilhões de anos. Esse tempo é inferior ao tempo para desenvolver uma civilização. Isto significa que a faixa que pode ser habitada para seres inteligentes, no disco galáctico, é uma faixa muito estreita de 200 pc no total, e que temos sorte que o Sol tenha nascido nesta faixa. É uma sorte, mesmo?

3.4 Potencial efetivo

O “potencial efetivo” é um método clássico da mecânica clássica utilizado para descrever órbitas de estrelas num sistema em que o próprio potencial gravitacional se encontra em rotação. Essa definição pode ser pouco esclarecedora, e valeria a pena estudar esse assunto, mas seria muito longo tratar desta questão aqui, e iremos direto aos resultados. Temos que estar de posse da descrição do potencial de um braço, somar o efeito de todos os braços, e levar em conta a velocidade de rotação dos braços. Podemos usar dados do modelo de braços espirais de Junqueira et al (2013) [7].

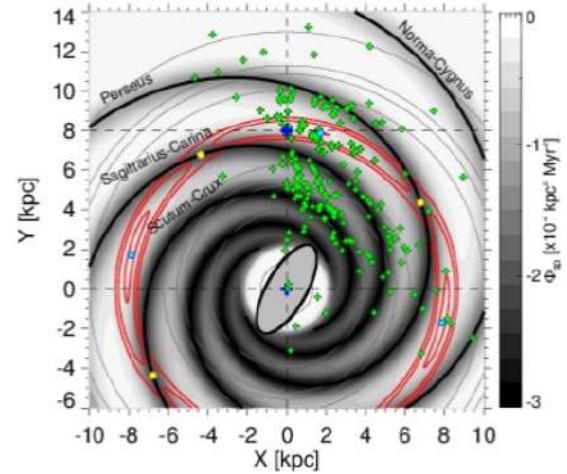


Figura 11: Em vermelho encontram-se as curvas de nível do potencial efetivo devido à rotação dos braços galácticos. Aparecem 4 ressonâncias equidistantes separadas de 90 graus. O Sol tem sua posição indicada por um ponto azul, na posição $x = 0, y = 8$ kpc. “Nossa” ressonância se estende desde o braço de Sagitarius-Carina até o braço de Perseus, com um comprimento da ordem de 10 kpc. Essa ressonância coincide muito bem com o braço local. Os pontos verdes são fontes de emissão de radiação *maser* geralmente consideradas como indicadoras de braços espirais. A amostra dos *masers* sofre de um viés nas detecções, que resultam de um levantamento feito só numa parte do céu, e por isso não comentaremos a distribuição.

Ele adotou uma gaussiana como sendo a forma do perfil de um braço, com uma largura da ordem de 1 kpc, sendo que a distâncias entre os braços é da ordem de 3 kpc. O resultado do cálculo de potencial efetivo é mostrado na Figura 11 (Barros et al, 2021 [8]).

3.5 As “correntes estelares” ou “moving groups”

Vamos introduzir aqui os “*moving groups*”, o que a primeira vista parece um assunto deslocado da descrição dos grandes componentes da Galáxia, mas mostraremos que eles tem seu lugar na descrição das propriedades do disco galáctico.

Nas primeiras décadas do século 20 foram aprimorados os catálogos de estrelas, sempre privilegiando as mais próximas, e foram acumuladas as medidas de velocidades das estrelas, tanto no plano de céu, motivadas em parte pelo interesse em se medir distâncias de estrela por meio de paralaxe, quanto na direção radial (perpendicular ao plano do céu) por meio de espectros; logo se notou que algumas estrelas se deslocavam no

céu, muito além da paralaxe, mas com um movimento sempre numa mesma direção, com velocidade constante. Esses movimentos foram chamados de movimentos próprios. Nada de anormal, até aí: é aceitável que uma estrela tenha sua própria velocidade, no espaço. No entanto, veio uma surpresa quando se descobriu que alguns grupos de estrelas, contendo por exemplo uma dezena de estrelas, possuíam a mesma velocidade em pc/ano (não falamos mais de velocidade angular) e apontando para uma mesma direção. O.J. Eggen publicou uma grande quantidade de estudos sobre esse assunto nas décadas de 1970 a 1990, mas outros autores também contribuíram. Esses grupos foram às vezes chamados de “*superclusters*” (superaglomerados) – ou de “*stellar streams*” (correntes de estrelas), até que no final o termo “*moving groups*” se consolidou, e foi adotado em diversas línguas (francês, português, etc). Portanto, usaremos “*moving groups*”. A expressão “*superclusters*”, agora abandonada, vinha da suposição de que as estrelas provenientes de um mesmo aglomerado poderiam ter velocidades muito parecidas. No entanto os *moving groups* contém estrelas com uma variedade de idades, o que exclui um nascimento único.

T. Antoja (2008) [9] re-catalogou todos os *moving groups*, com a lista das estrelas atribuídas a cada um deles, num trabalho de folego, e com análise inovadora. Claro, os dados que requerem mais atenção são as componentes de velocidade U e V observadas nas direções X e Y das coordenadas, no plano galáctico. São esses dados que comprovam a pertinência a algum *moving group*. Para complementar o estudo, Antoja coletou na literatura as idades e metalicidades.¹ Estes dados existem apenas para uma pequena fração das estrelas do novo catálogo, mas são importantes para tentar esclarecer a origem das estrelas de cada grupo.

O método de análise foi o de “*wavelet*”(pequenas ondas). Esse método tem por objetivo alisar os dados, dando a suas propriedades um aspecto de variação continua. O resultado da análise é dado na Figura 12.

Sem a análise por *wavelet* a distribuição estaria cheia de pequenos picos e buracos, devido a erros nas medidas de estrelas e a incompletezas (pequenas zonas sem estrelas), O método *wavelet*

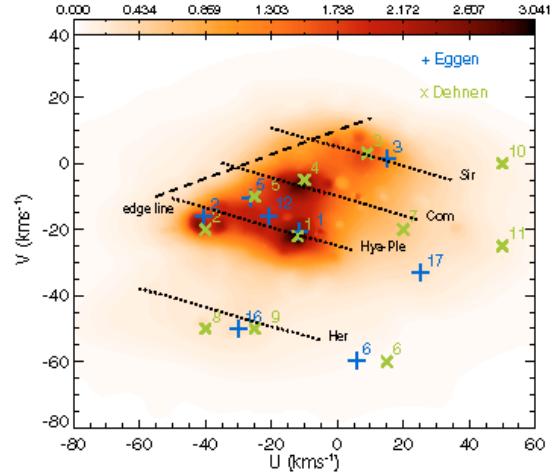


Figura 12: Resultado da análise feita por T. Antoja et al. (2008) da distribuição de velocidades no plano U , V de uma grande quantidade de estrelas da vizinhança solar. A distribuição foi submetida a um procedimento de suavização, o “*wavelet*”. As cores, explicadas acima do gráfico, são proporcionais aos números de estrelas por unidade de área do gráfico. Os *moving groups* são identificados com nomes de alguma estrela ou grupo de estrelas bem conhecidos, que pertencem ao grupo, como Sirius, Hyades, Pleiades. Antoja inseriu no gráfico uma linha tracejada, que denominou “*edge line*” - linha de borda - porque outros autores, trabalhando com números menores de estrelas, já tinham chamado atenção sobre essa linha.

consegue dar ênfase aos aspectos da distribuição que são realmente significativos.

A subdivisão entre os diversos subgrupos parece pouco clara na Figura 12, que é um gráfico de distribuição de velocidades. No entanto os *moving groups* apresentam posições distintas no espaço XY , o que ajuda a reconhecer a qual *moving group* determinada estrela pertence.

Esse trabalho de Antoja foi excelente para fornecer um quadro descritivo detalhado dos *moving groups*, mas não chegou a esclarecer a razão dos movimentos.

3.6 Mapas dinâmicos e a origem dos *moving groups*

O Sol se encontra preso dentro de uma espécie de bolha que é a zona de co-rotação, uma pequena área do disco no local onde o efeito da ressonância é mais concentrado. Os astrônomos que trabalham em astronomia dinâmica desenvolveram ferramentas que geralmente os astrônomos de outras áreas ignoram; uma delas é “o mapa dinâmico”.

¹Em Astronomia, “metalicade”

Esses mapas são obtidos integrando as órbitas de um grande numero de estrelas de uma região. Eles revelam a existência de órbitas que são chamadas de caótica. Essas, em vez de se mostrarem lisas e regulares como as órbitas normais, apresentam-se como indo e vindo em longitude e latitude, de forma aleatória, com mudanças muito frequentes de amplitude e de direção da velocidade. Os especialistas em mecânica celeste já tinham constatado, observando coleções de objetos de diversos tipos, que os mapas dinâmicos apresentam em torno das ressonâncias, fronteiras ricas em órbitas caóticas.

T.A. Michtchenko, pesquisadora do IAG-USP, e seu grupo, empreenderam o trabalho de construir um mapa dinâmico das estrelas da vizinhança solar

O mapa foi feito “integrando” as órbitas de estrelas que foram observadas pela missão GAIA, selecionando as que estão dentro de um raio de 1 kpc em torno do Sol. Essa seleção de amostra garante que as distâncias, e velocidades radiais e longitudinais foram medidas com precisão suficiente para nosso propósito de integração seja bem sucedido. Como já discutimos anteriormente, para proceder a uma integração, temos que dispor de um modelo que descreve as forças que atuam sobre a estrela. Anteriormente, chegamos a fazer apresentar integração de órbitas num ambiente maior, sem considerar os braços, quando o objetivo era explicar os braços. Mas agora, foi possível levar em conta os braços, e nos concentrar em uma área bastante menor. O leitor sabe que um braço é constituído de muitas órbitas estelares próximas umas das outras. Um lugar que concentra um grande numero de estrelas atua como um centro de atração gravitacional.

Para levar em frente uma integração com a presença dos braços, foi usado o modelo de braços espirais de Junqueira et al. Ele adotou uma gaussiana como sendo a forma do perfil, com uma largura da ordem de 1 kpc, quando sabemos que a distância entre os braços é da ordem de 3 kpc. Nessas escalas, o disco da Galáxia é parecido com uma telha ondulada, em termos de largura, separação e profundidade de máximos de potencial. Porque os braços parecem tão finos na Figura 8, ao contrário da Figura 12? Nossa resposta é porque as estrelas, que são os marcadores de braços, só se formam no fundo do poço, onde a densidade

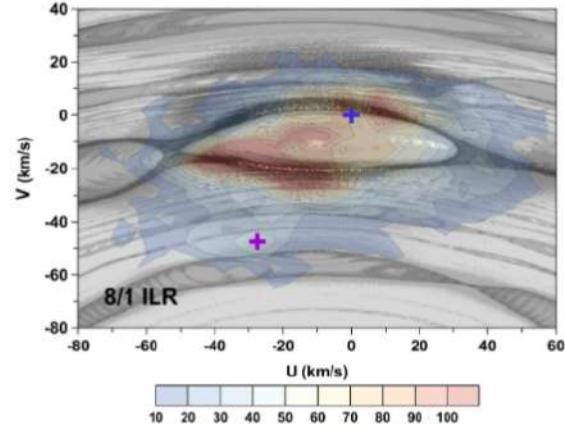


Figura 13: Mapa dinâmico de uma região da vizinhança solar, construído por Michtchenko et al (2017), no qual a ressonância de co-rotação está em evidência. Foi superposta a distribuição de *moving groups* de T. Antoja, a mesmo da Figura 12, colocada na mesma escala em, em tons marrons. A posição do Sol é indicada pela cruz azul dentro da ressonância.

do gás é maior. O leitor não precisa se preocupar com a amplitude de nossa telha ondulada. A amplitude do potencial que estamos descrevendo é muito pequena, da ordem de 3% do potencial geral da curva de rotação, e que é responsável pela estrutura espiral. Tudo que foi dito a respeito da forma das órbitas estelares em seções anteriores continua válido. Estamos introduzindo uma pequena perturbação, mas esta é necessária para obter um mapa dinâmico.

T. Michtchenko et al (2017) [10] fizeram a integração das órbitas das estrelas selecionadas como descrito acima; o resultado é apresentado na Figura 13. Nessa figura, cujos eixos são as velocidades U e V das estrelas, podemos reconhecer perfeitamente a ressonância de co-rotação, dentro de seu contorno que indica a grande quantidade de órbitas caóticas. Esse são os pontos iniciais das órbitas calculadas, ou seja, iniciando uma integração de órbita partir de um ponto desse contorno, teremos uma órbita caótica.

Na mesma região do mapa reproduzimos o mapeamento dos *moving groups* realizado por Antoja, apresentado anteriormente na Figura 12, em tons marrons. A semelhança do contorno caótico da ressonância local com a forma da região de velocidades dos *moving groups* é inegável.

O mínimo que podemos dizer é que uma grande fração dos *moving groups* se encontram no interior da zona de ressonância, na qual o Sol também

se encontra. Podemos nos perguntar, ainda assim, porque a coincidência não é perfeita. Acreditamos que pode ser consequência do erros acumulados para chegar até o mapa dinâmico. Vários parâmetros importantes foram fixados por modelos, como por exemplo a posição exata dos braços espirais, largura e profundidade do potencial dos braços, valor exato do raio de co-rotação, etc. Assim, pequenos erros nos parâmetros podem ter afetado o resultado final. Outro fator que pode dar a impressão de ajuste imperfeito é que além da co-rotação existem outras ressonâncias, como duas visíveis no mapa dinâmico e designadas por 8/1. Outras menores ainda como a 12/1 são praticamente invisíveis na Figura 13. Essas ressonâncias menores tem a capacidade de capturar estrelas formando *moving groups*.

A descoberta da natureza dos *moving groups* foi um feito importante, que está permitindo novos avanços, em andamento, no entendimento da dinâmica das estrelas da vizinhança solar. Terminamos aqui a discussão do disco galáctico, e passaremos a apresentar a barra e o bojo da Galáxia. Tratando-se de objetos mais distantes, nos quais não estamos imersos, e que são mais difíceis de observar, não será surpresa se muitas vezes as informações apresentadas forem mais imprecisas.

4 A barra

A barra é um elipsoide que em sua dimensão maior (o eixo da barra) tem comprimento total da ordem de 7 kpc, ou seja 3,5 kpc entre o centro galáctico e a ponta. Esse eixo tem orientação com ângulo entre 20 e 22 graus com relação com relação à linha que une o centro da Galáxia ao Sol. A largura da barra, dentro do plano do disco Galáctico, é de aproximadamente 3 kpc. A espessura, na direção perpendicular ao plano, é da ordem de 1,5 kpc.

Em praticamente todas as representações do disco galáctico que incluem a barra, esta é representada por um oval, sem maiores detalhes sobre a forma real. Apresentamos na Figura 14 o desenho da barra segundo Michtchenko et al (2018) [11], no qual o formato externo é parecido com um retângulo.

Um dilema que se apresenta na organização deste capítulo é saber se a barra e o bojo são dois

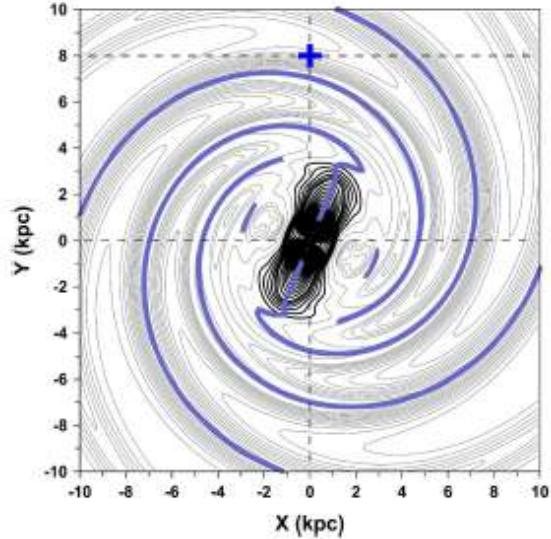


Figura 14: A barra da galáxia segundo Michtchenko et al (2018).

componentes distintos, ou a barra é um apenas prolongamento do bojo.

Essa é uma discussão bizantina. Os textos do século passado tinham tendência em separá-los completamente em dois componentes da Galáxia, talvez influenciados pelas classes de galáxias introduzidas por Hubble. As galáxias tinham, ou não tinham, braços. Portanto, barra e bojo são componentes independentes. Mais recentemente, no entanto, percebeu-se que a conexão entre a barra e o bojo não é tão definida, no local onde se esperaria uma fronteira. Parece haver uma continuidade entre os dois componentes. A espessura da barra vai crescendo, das extremidades da barra até o bojo, coincidindo com a espessura do bojo. Nessa respeito de bojo + barra ou um bojo-barra, tendemos a acreditar que esta segunda posição é a mais viável. De qualquer forma, o importante é tentar descrever toda a geometria de forma correta. É um consenso de que a barra é constituída de estrelas velhas e pouco luminosas, com baixa metalicidade, precisamente como acontece no bojo, e em contraste com o disco, no qual as estrelas mais jovens são abundantes.

Para comparação na Figura 15 apresentamos o modelo da barra por Bland Hawthorn e Ghezard (2016). A imagem do centro, com a barra vista de cima tem semelhança com a Figura 14 (de Michtchenko et al [10], veja também [11]) se considerarmos a contorno colorido em verde. A imagem de cima mostra de forma clara que a

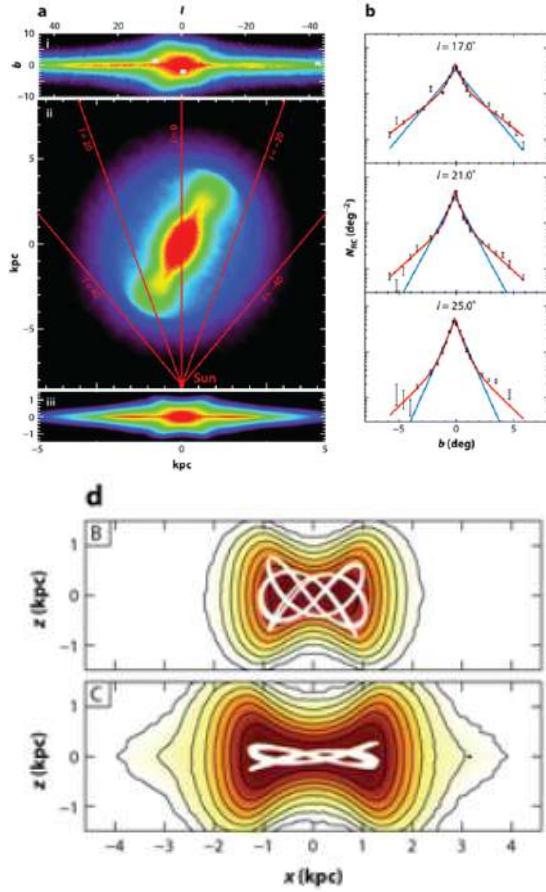


Figura 15: Mostramos sugestões de órbitas de estrelas que poderiam existir no interior da barra-bojo. Essas órbitas poderiam explicar a forma de amendoim (peanut-shaped) sugerida para o bojo (Bland-Hawthorn and Gerhard, 2016)

barra está na continuidade do bojo. As duas linhas que não são paralelas, na parte superior e inferior, são explicadas por um efeito de perspectiva de uma barra com ângulo de 22 graus com respeito a linha Sol-centro, um lado (longitudes positivas) estando mais próximo do que o outro (longitudes negativas).

Na Figura 15 mostramos sugestões de órbitas de estrelas que poderiam existir no interior da barra-bojo. Essas órbitas poderiam explicar a forma de amendoim (peanut-shaped) sugerida para o bojo (Bland-Hawthorn e Gerhard, 2016, [12], ver também [13]).

Uma observação mais recente, como sugere que essa depressão que vemos na parte superior e inferior da Figura 15 realmente existe. Há uma controvérsia com relação ao comprimento da barra. Gerhard e Wegg, e López-Corredoira [13, 14], por exemplo, defendem a ideia de uma barra longa,

que seria espessa até a distância de 3,5 kpc do centro, e depois, seria prolongada por uma estrutura de pouca espessura até 4,6 kpc do centro, Não compartilhamos essa visão. Por exemplo, na Figura 8 que representa a os braços espirais, há uma barra oval, representada esquematicamente, Na extremidade mais próxima de nós, a barra está sendo atravessada por pelo menos 2 braços espirais. Isso é impossível, não pode haver braço espiral dentro de uma barra. Isso mostra que a barra não pode ser mais longa que 3,5 kpc

A maioria dos pesquisadores considera que esse prolongamento não faz parte da barra, e que a barra tem comprimento entre 2,9 e 3 kpc. A “extensão” aparente poderiam até ser braços espirais; pois sabemos Galáxia possui dois braços conectados a cada uma das extremidades da barra, dando origem à estrutura de 4 braços. Gerhard estava motivado a considerar uma barra mais comprida e além disso a velocidade de rotação da barra mais alta do que a do disco (40 km/s/kpc em vez de 28 km/s/kpc), para dar uma explicação que ele considera mais correta do conjunto de ressonâncias e suas coincidências com os *moving groups*. Michtenko contrapôs seus argumentos e mostrou que seu modelo, em que a barra gira como o disco, é menos arbitrário, explica melhor as coincidências de ressonâncias de Lindblad com os *moving groups* observados; e produz uma conexão estável entre os braços e a barra.

5 O bojo

A visão clássica de um bojo é inspirada da forma de galáxias elípticas. O bojo e o halo são componentes aproximadamente esféricos, com centro coincidindo com o centro do disco. Em uma primeira aproximação tem a forma de um esferoide (ou de uma bola achatada). O achatamento é moderado, com dimensão cerca de 20% menor na direção do eixo do disco. O bojo é constituído de estrelas bastante mais velhas que as do disco, com cor avermelhada, e com órbitas sem organização aparente. As idades são estimadas por meio de diagramas HR (um gráfico da luminosidade versus índice de cor de amostras de estrelas) e pela composição química, sendo que as estrelas do bojo são mais pobres em metais do que as estrelas do disco. O que escrevemos acima era uma

espécie de consenso, mas, no entanto, sem grande precisão quanto às dimensões. A forma do bojo foi obtida recentemente de maneira confiável por um grupo internacional ligado ao ESO (E. Valenti et al, 2016 [15]). Esses autores fizeram varreduras em longitude no intervalo de $+10^\circ$ a -10° e em latitude, no intervalo de -9.5° a $+9.5^\circ$, cobrindo bem toda a região central (Figura 6), contando as estrelas de tipo “*red clump*” (RC). Esse termo, que poderia ser traduzido por “aglomeração vermelha”, designa uma região do diagrama HR, Por enquanto, vamos só reter a informação de que as RC são estrelas bastante luminosas e vermelhas, e relativamente fáceis de serem detectadas no infravermelho.

A Figura 16 mostra as quantidades de estrelas RC ao longo das linhas de visadas para cada ponto, usando como unidade um milhão de estrelas por grau quadrado. Podemos ver que é para latitude $b = 0^\circ$ que temos as maiores densidades (linha preta) e que para essa latitude, temos um pico acentuado em longitude zero. Portanto, o bojo tem um forte pico de densidade em seu centro. Podemos reparar, também, que uma série de pontos situados numa linha de latitude constante (por exemplo a linha amarela) terá menos contagens quanto mais afastada passa do centro. Observando essa figura estimamos o tamanho do bojo. Se considerarmos que o bojo “acaba” onde a densidade caiu para 10% do valor do pico, podemos avaliar a dimensão, no sentido da longitude, em 5 graus, e em sentido da latitude, em 4 graus. Sabendo que o bojo está a 8 kpc, tomando a tangente do ângulo, obtemos as dimensões em unidades de kpc, 0,7 kpc e 0,56 kpc, respectivamente, sendo a dimensão ao longo da longitude (o equador do esferoide), 25% maior. Os números não são muito diferentes daqueles que tínhamos para o esferoide, antes do artigo de Avanti et al.

6 O halo

O halo é o maior componente da Galáxia, mas no entanto será aquele que receberá a menor atenção em nosso texto. É esférico, com raio de até 100 kpc, sendo possível, no entanto, que algumas órbitas estelares atinjam 300 kpc. Como outras estruturas, suas fronteiras não são bem definidas, e assim, também, suas dimensões. Tem densidade

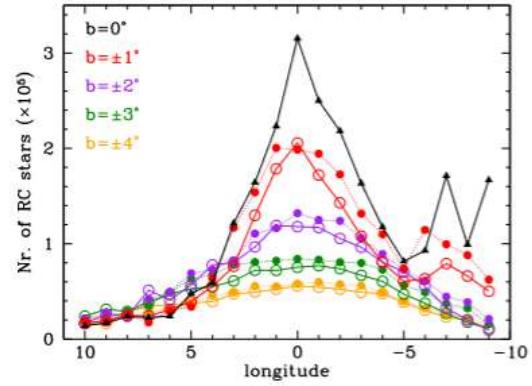


Figura 16: Quantidades de estrelas RC ao longo das linhas de visadas do bojo para cada ponto, usando como unidade um milhão de estrelas por grau quadrado.

de gás e de estrelas muito baixas, decrescendo de dentro para fora. As órbitas estelares parecem aleatórias, existindo muitas com um movimento de rotação no sentido retrógrado (contrário à rotação do disco). Em contraste com sua baixa densidade, o halo contém objetos proeminentes, que são uma centena se aglomerados globulares. Estes aglomerados são concentrações esféricas de estrelas, dos quais M92 (Figura 17) é um exemplo. Os aglomerados globulares contêm de 100 000 até milhões de estrelas, que são as estrelas mais velhas encontradas na Galáxia, com idades de 12 a 13 bilhões de anos, sendo que a idade do universo é estimada em 13,7 bilhões de anos. Considera-se que não há distinção entre as estrelas do halo e as dos aglomerados globulares, em termos de distribuição de massa e de idades. Talvez halo seja constituído de remanescentes de aglomerados globulares?

6.1 Um estudo da velocidade e excentricidade das estrelas em função da metalicidade

A seguir apresentamos um estudo da distribuição de metalicidade num estudo que inclui estrelas do halo por B. Carney et al (1996) [16]. A metalicidade, na prática, é um índice que fornece a razão de átomos de Fe (ferro) para H, porque uma linha de Fe é a única fácil de medir. O índice $[Fe/H]$ ou $[m/H]$ é fornecido numa escala logarítmica decimal (somar 1 equivale a aumentar a abundância relativa por um fator 10). Esse índice é um indicador de idade, pois a metalicidade au-



Figura 17: O aglomerado globular M 92.

menta com a idade. As estrelas do disco galáctico estão na concentração de pontos à direita com velocidades próximas de 0. A velocidade é pequena porque estão sendo medidas a partir do Sol, e as estrelas vizinhas têm velocidades parecidas.

As estrelas do halo apresentam velocidades negativas. As velocidades das estrelas do halo estão centradas em -220, a velocidade do Sol no disco, como se o halo representasse um referencial sem rotação, em média, mas existem estrelas com rotação em sentido contrário do disco.

Um outro estudo dos mesmos autores apresenta a excentricidade das órbitas. Este parâmetro mede o alongamento das órbitas. Uma órbita circular em excentricidade 0, uma estrela com órbita extremamente alongada pode chegar a excentricidade 1.

Nesse novo gráfico, não existem órbitas circulares (a excentricidade de um círculo é zero) mas a grande maioria das estrelas tem órbitas bastante alongadas, com excentricidade próximas de 1, como se não fossem elípticas, ou como se praticamente não existisse uma concentração central de massa. Em resumo, temos no halo estrelas com órbitas muito difíceis de serem modelizadas

Para finalizar a seção sobre o halo, apresentamos uma figura muito esquematizada representando a Galáxia, com seu disco, seu halo com alguns aglomerados globulares, seu bojo e seu disco. Há uma representação, por meio de flechas, da órbita da Galáxia Anã de Sagitário. Esta é uma galáxia anã que está caindo sobre a Galáxia, e que será totalmente absorvida, mas que no mo-

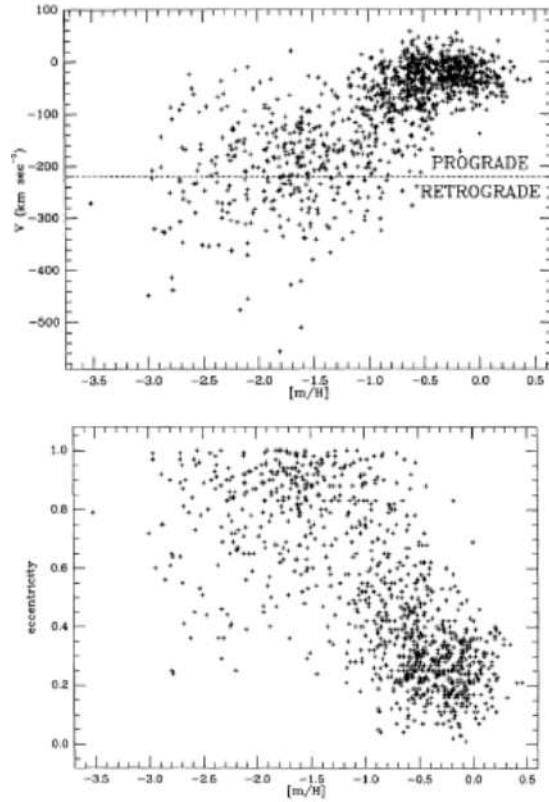


Figura 18: Velocidade e excentricidade das órbitas estelares em função da metalicidade, B. Carney et al, (1996).

mento podemos considerar como um habitante do halo. Por enquanto não atravessou o disco, mas deverá fazê-lo. O ponto de incidência não será muito longe do Sol.

7 Conclusão

Espero que este texto tenha contribuído para o leitor entender uma série de fenômenos, relacionados com a nossa Galáxia, e que além disso, para ele perceber que o fato de entender alguns fenômenos proporciona uma sensação agradável de descoberta. Fazer ciência, hoje, talvez seja menos prazeroso do que era algumas décadas atrás, porque o ritmo das descobertas ultrapassa o ritmo natural de nosso aprendizado. Não temos o tempo de digerir uma quantidade impressionante de dados novos, oriundos de “surveys” muito eficientes feitos por missões espaciais, em comprimentos de ondas antes inexplorados. As interpretações de dados e os modelos se multiplicaram.. Numa reunião científica com boa quantidade de participantes, modelos incompatíveis en-

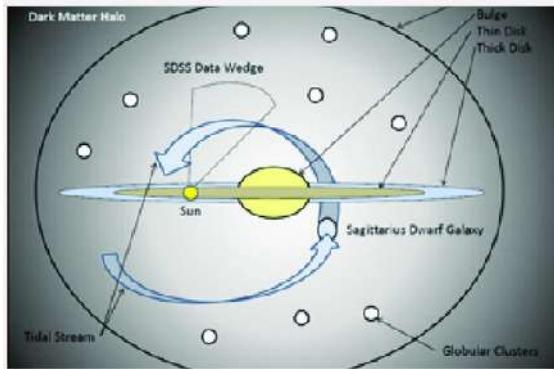


Figura 19: Representação da Galáxia com seus diversos componentes.

tre si convivem. Os autores não têm tempo para ler e entender os artigos dos outros. Inclusive, astrônomos jovens pensam que o que foi feito em épocas anteriores tem pouco valor. Como podiam fazer boa ciência no passado, se não possuíam todos esses dados que temos hoje?

Aproveitando a reflexão sobre aspectos gerais dos rumos da ciência, discutiremos o do problema da matéria escura, que parece ser o protótipo do assunto no qual o questionamento faz falta.

A hipótese da matéria escura surgiu em parte para explicar por que as curvas de rotação de galáxias são planas até grandes distâncias do centro do disco, onde não há mais matéria suficiente para sustentar essas curvas, que deveriam cair. Foi qualificada de escura porque não a vemos e não a detectamos. Outra questão que sustentou (e ainda sustenta) a hipótese da matéria escura é a distribuição de velocidades de galáxias situadas na periferia de aglomerados de galáxias. A “descoberta” da matéria escura é atribuída a Fritz Zwicky, astrônomo suíço-búlgaro, que publicou um artigo em 1933 sobre essas velocidades. O conceito apareceu também relacionado com as curvas de rotação de galáxias, que implicavam em massas muito maiores do que se imaginava, para os halos galáticos.

A questão extragaláctica envolve dimensões muito maiores do que as dos discos halos galáticos, e poderia eventualmente revelar um outro tipo de matéria escura. Mas vamos estabelecer uma ligação entre escalas de dimensões diferentes. O conceito de matéria escura é uma explicação para efeitos gravitacionais que não são explicados pela mecânica clássica nem pela relatividade geral, que tornariam necessária a existência de mais

matéria do que conseguimos ver ou detectar.

Aparentemente a maioria dos astrônomos acredita em matéria escura, embora não disponhamos de levantamento de opinião que confirme esse dado.

Voltando às curvas de rotação, que ocupam uma posição importante neste texto, cabe esclarecer que não faltam candidatos convencionais para os efeitos gravitacionais observados. Um exemplo seria um disco rico em moléculas H₂, que não emitem nem absorvem radiação, por não possuírem um momento de dipolo. Como o elemento H é um elemento primordial muito abundante, não seria surpreendente que uma boa parte desse elemento se encontre na forma de H₂. Existem teorias de reações moleculares que estabelecem uma provável relação entre abundância de CO e a de H₂. No entanto, há um problema em se usar CO como traçador de H₂: as calibrações feitas na vizinhança solar da razão CO / H₂ não são válidas a grande distância. Deveriam ser corrigidas, porque há diminuição da abundância relativa de CO com a distância galatocêntrica. CO foi produzido no interior de estrelas, ao contrário de H que é primordial. Este fato sugere que a densidade de H₂ é subestimada.

É interessante voltar a olhar para a Figura 8 na qual aparece um braço espiral se estendendo até 14 kpc. Um braço espiral indica a presença de estrelas massivas, e de gás para formá-las. Como poderia estar lá, tão longe do centro do disco? A matéria que forma braço não poderia estar ajudando a curva a ficar plana?

Outra contribuição que foi sugerida para a massa, e que não é estranha, é a dos *Machos* (*Massive Compact Halo Objects*), que são, no halo, uma população de estrelas escuras, tipo estrelas de nêutrons, ou mesmo anãs vermelhas, que seriam indetectáveis a grandes distâncias.

Além dos componentes “massivos” invisíveis, não podemos excluir explicações para a curva plana que não sejam de matéria escura, mas de simples mecânica celeste e hidrodinâmica? Há evidências de que o disco da Galáxia está em expansão. Por exemplo, J. Sanders et al (1919) concluíram que o raio até a metade da massa do disco da galáxia aumentou em 43% nos últimos 7 bilhões de anos. Há um processo de expansão em andamento. Como se comporta a distribuição de matéria e a distribuição de excentricidade das

órbitas durante essa expansão?

Independentemente disso, sabemos que o disco é bombardeado por uma chuva de pequenas nuvens de gás que provém de grandes distâncias da Galáxia. Como a curva de rotação é afetada por esse processo de acreção? Os braços espirais também devem ter um papel na evolução do disco. Como os braços se comportam como um corpo rígido, a grandes distâncias apresentam velocidades de rotação muito maiores que as das estrelas para a mesma distância. Por exemplo, a 16 kpc a matéria continuaria com uma velocidade de 220 km/s (se a curva for plana), mas os braços giram a uma velocidade da ordem do dobro disso, considerando que a co-rotação é próxima do Sol em 8,5 kpc. A velocidade dos braços com relação ao meio circundante seria de 200 km/s, o que sugere ondas de choque violentas. Não poderia haver indução, pelos braços espirais, de estrelas com altas velocidades? Lembrando que os braços são formadores de estrelas, podemos nos perguntar com que velocidade as estrelas seriam ejetadas dos braços, logo depois de formadas? Seriam as estrelas mais visíveis, por serem jovens? Seriam injetadas em órbitas com raios maiores? Enfim, na lista acima, há algumas sugestões de fenômenos que eventualmente poderiam levar a curvas planas.

Nossa ignorância sobre esses fenômenos é grande. Mas alguns problemas são tratáveis. Com um trabalho árduo, dentro da física clássica, por exemplo estudando a interação entre os braços espirais e as estrelas, e as órbitas estelares com grande velocidade inicial, deveria ser possível haver algum progresso.

É muito cedo para poder afirmar que estão descartadas todas as soluções dentro da física clássica. E se não estão descartadas, é então muito cedo para declarar que a matéria escura existe com certeza.

Agradecimentos

Agradeço à minha esposa Ruth Gruenwald por seu apoio constante, inclusive em questões de internet/informática. Agradeço os meus colaboradores em artigos científicos, com os quais tive o prazer de manter discussões sobre a estrutura da Galáxia, e escrever vários artigos, em particu-

lar Tatiane Michtchenko, Douglas Barros, Wilton Dias, Hektor Monteiro, Sergio Scarano Jr. Agradeço Júlio Fabris por ter me convidado a redigir esse texto para os *Cadernos de Astronomia*, e ajudado na fase de edição. Agradeço a FAPESP e o CNPq pelos auxílios recebido durante muitos anos, que possibilitaram chegar as estes resultados.

Sobre o autor

Jacques Lépine (jacques.lepine@iag.usp.br) é professor titular no IAG-USP e pesquisador 1A do CNPq. É membro da Academia Brasileira de Ciências e da Academia Mundial de Ciências (TWAS). Dedica atualmente a maior parte de seu tempo ao LLAMA, projeto de radiotelescópio nos Andes.

Referências

- [1] D. Clemens, *Massachusetts-Stony Brook Galactic plane CO survey: the galactic disk rotation curve.*, *The Astrophysical Journal* **295**, 422 (1985).
- [2] L. Fich, M.; Blitz e A. A. Stark, *The Rotation Curve of the Milky Way to $2R_0$* , *The Astrophysical Journal* **342**, 272 (1989).
- [3] Ž. Chrobáková et al., *Gaia-DR2 extended kinematical maps-III. Rotation curves analysis, dark matter, and MOND tests*, *Astronomy & Astrophysics* **642**, A95 (2020).
- [4] A. Kalnajs, *Spiral structure viewed as a density wave*, *Publications of the Astronomical Society of Australia* **2**(4), 174 (1973).
- [5] W. d. S. Dias et al., *The spiral pattern rotation speed of the Galaxy and the corotation radius with Gaia DR2*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **486**(4), 5726 (2019).
- [6] L. Marochnik, *On the position of the Sun in the Galaxy*, *Astrophysics* **19**, 278–283 (1983).

- [7] T. Junqueira et al., *A new model for gravitational potential perturbations in disks of spiral galaxies. An application to our Galaxy*, *Astronomy & Astrophysics* **550**, A91 (2013).
- [8] D. Barros et al., *INSERIR TITULO DO ARTIGO*, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **8**, 48 (1981).
- [9] T. Antoja et al., *Origin and evolution of moving groups-I. Characterization in the observational kinematic-age-metallicity space*, *Astronomy & Astrophysics* **490**(1), 135 (2008).
- [10] T. A. Michtchenko et al., *Modelling resonances and orbital chaos in disk galaxies-Application to a Milky Way spiral model*, *Astronomy & Astrophysics* **597**, A39 (2017).
- [11] T. A. Michtchenko et al., *Combined dynamical effects of the bar and spiral arms in a Galaxy model. Application to the solar neighbourhood*, *Astronomy & Astrophysics* **615**, A10 (2018).
- [12] J. Bland-Hawthorn e O. Gerhard, *The galaxy in context: structural, kinematic, and integrated properties*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **54**, 529 (2016).
- [13] O. Gerhard e C. Wegg, *The Galactic Bar*, in *Lessons from the Local Group* (Springer International Publishing, 2015), 43–52.
- [14] M. López-Corredoira et al., *A major star formation region in the receding tip of the stellar galactic bar. II. Supplementary information and evidence that the bar is not the same structure as the triaxial bulge previously reported*, *The Astronomical Journal* **118**(1), 381 (1999).
- [15] E. Valenti et al., *Stellar density profile and mass of the Milky Way bulge from VVV data*, *Astronomy & Astrophysics* **587**, L6 (2016).
- [16] B. W. Carney et al., *A survey of proper motion stars. XIII. The Halo population*, *The Astronomical Journal* **112**, 668 (1996).

Mapeamentos de galáxias

Bruno Azevedo Lemos Moraes

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

Neste artigo, abordamos o desenvolvimento dos mapeamentos de galáxias e a sua importância para a astrofísica extragaláctica e para a cosmologia. Acompanhando a evolução dos telescópios, instrumentos e técnicas de observação astronômica desde o século XIX, discutimos como os avanços tecnológicos permitiram desvelar propriedades fundamentais do universo, tal como sua dinâmica, composição e sua estrutura em grande escala. Os mapeamentos de galáxias também revelaram a presença de matéria escura em diferentes escalas e seu impacto tanto na topologia da teia cósmica quanto nos processos de formação e evolução das galáxias. Observações das diferentes propriedades das galáxias individuais e suas correlações espaciais induzidas pelo ambiente local fornecem evidências para testar diferentes modelos físicos da interação gravitacional e seu impacto nos processos energéticos que contribuem para moldar os diferentes tipos de galáxias e suas características. Simulações de n-corpos possuem um papel crucial na reprodução da formação e evolução das estruturas cósmicas, permitindo contrastar as observações com universos simulados e testar teorias e hipóteses sobre a dinâmica do universo e a formação de galáxias. Em suma, a análise da estrutura em grande escala e dos efeitos ambientais na formação e evolução das galáxias ilustram a conexão complexa entre a cosmologia e a astrofísica modernas e ressalta a importância dos mapeamentos de galáxias para melhor entendê-las, apontando para o potencial de descobertas futuras à medida que as tecnologias e métodos observacionais continuem a evoluir.

Abstract

In this article, we discuss the development of galaxy surveys and their importance for extragalactic astrophysics and cosmology. Following the evolution of telescopes, instruments and astronomical observation techniques since the 19th century, we discuss how technological advances have made it possible to unveil fundamental properties of the universe, such as its dynamics, composition and large-scale structure. Galaxy surveys have also revealed the presence of dark matter on different scales and its impact on both the topology of the cosmic web and the processes of galaxy formation and evolution. Observations of the different properties of individual galaxies and their spatial correlations induced by the local environment provide evidence to test different physical models of gravitational interaction and their impact on the energetic processes that contribute to shaping the different types of galaxies and their characteristics. N-body simulations play a crucial role in reproducing the formation and evolution of cosmic structures, allowing us to contrast observations with simulated universes and test theories and hypotheses about the dynamics of the universe and the formation of galaxies. In short, analysing the large-scale structure and environmental effects on the formation and evolution of galaxies illustrates the complex connection between modern cosmology and astrophysics and highlights the importance of mapping galaxies to better understand them, pointing to the potential for future discoveries as technologies and observational methods continue to evolve.

Palavras-chave: galáxias, astronomia, astrofísica, cosmologia.

Keywords: galaxies, astronomy, astrophysics, cosmology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43769](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43769)

1 Introdução

Galáxias são objetos astronômicos complexos. A competição entre a atração gravitacional e os efeitos repulsivos e turbulentos de reações nucleares gera uma grande variedade de fenômenos e estruturas: rotação, formação de braços espirais,

barras em bojos, diferentes cores devido à taxa de formação estelar e à formação de elementos mais pesados, ondas de choque e muitos mais. O estudo da dinâmica e propriedades de galáxias e sua evolução formam vastas áreas de estudo astrofísico, apoiando-se tanto em técnicas e modelos matemáticos quanto em simulações numéricas.

A riqueza fenomenológica não se encerra no estudo de galáxias individuais; a distribuição de galáxias no universo é também bastante sensível à dança entre a física gravitacional e a física nuclear, termodinâmica e física estatística. Adicionalmente, a expansão do universo e seus efeitos na matéria e energia se fazem sentir em grandes escalas de distância e de tempo, trazendo mais uma componente física a influenciar a distribuição de galáxias. A influência combinada destes atores possui ao menos duas grandes consequências: a estrutura em grande escala do universo desenvolve estruturas complexas ao longo da evolução cósmica, semelhante a uma “teia de aranha” tridimensional,¹ e as propriedades locais de regiões específicas nestas estruturas influenciam o tipo, quantidade e propriedades individuais de galáxias que ali estão presentes.

Mapeamentos de galáxias se desenvolveram ao longo do século XX e nas primeiras décadas do século XXI para estudar e melhor entender estas e outras questões. Do ponto de vista da cosmologia, a estrutura em grande escala do universo contém informações valiosas sobre as propriedades globais do universo. O processo de formação desta estrutura se dá em vastas escalas, bem menos sensíveis a processos energéticos complexos e à interação gravitacional em pequenas escalas. Também se dá em escalas de tempo longas, de forma que a lenta evolução cósmica pode agir e deixar suas marcas de forma aparente na distribuição. Medições das propriedades estatísticas da estrutura em grande escala fornecem vínculos precisos sobre parâmetros cosmológicos e sobre possíveis modificações da força da gravidade em grandes escalas, inacessíveis a experimentos locais. Do ponto de vista da formação e evolução de galáxias, caracterizar cuidadosamente as suas propriedades e as dos ambientes em que vivem permite estabelecer correlações empíricas e utilizá-las como um guia para o desenvolvimento de modelos que descrevam os diferentes processos físicos em jogo.

Embora hoje saibamos muito sobre a cosmologia e a astrofísica extragaláctica, o processo de observação, descoberta e modelagem destes fenômenos foi lento e cheio de obstáculos. A histó-

ria dos mapeamentos de galáxias está entremeada com a história dos percalços e sucessos da astronomia e cosmologia modernas. Desde a criação dos primeiros catálogos de nebulosas no século XIX, novas observações trouxeram novos enigmas que, por sua vez, motivaram o desenvolvimento ou adaptação de instrumentos e técnicas capazes de realizar observações mais precisas. Estas novas observações elucidam alguns dos mistérios e validam teorias, mas também levantam novas questões. O estudo da estrutura em grande escala do universo e da formação e evolução de galáxias com mapeamentos de galáxias exemplifica este desenvolvimento mútuo da ciência e da tecnologia que é característico de muitas áreas da ciência moderna.

O papel dos desenvolvimentos tecnológicos nos mapeamentos de galáxias não se resume ao desenvolvimento de novos instrumentos e técnicas observacionais; simulações computacionais do processo de formação de estruturas assumiram um papel cada vez mais central na compreensão e na análise dos dados obtidos com mapeamentos de galáxias a partir da segunda metade do século XX. Estas simulações cosmológicas, em sua forma mais simples, descrevem a evolução conjunta de um enorme número de “partículas” evoluindo conjuntamente sob a ação da força da gravidade gerada pelas mesmas. Até o início da década de 80, embora com pouco poder de cálculo e métodos numéricos mais rudimentares, já era possível demonstrar a importância de colisões de galáxias em seus processos evolutivos e investigar o impacto de modelos cosmológico na estrutura em grande escala do universo, dentre outros resultados. De lá para cá, as simulações cosmológicas evoluíram drasticamente, assumindo um papel indispensável na interpretação e análise dos mapeamentos de galáxias modernos.

Nas últimas décadas, mapeamentos de galáxias se tornaram uma empreitada de complexidade e tamanho comparável aos grandes aceleradores de partículas. Parte desta evolução foi causada pela descoberta da aceleração do universo, talvez gerada por uma hipotética energia escura. Junto com a questão da natureza da matéria escura, a cosmologia e a astrofísica extragaláctica se tornaram grandes “laboratórios naturais” para investigar possíveis componentes fundamentais do universo em escalas e regimes de energia dificilmente

¹Por esta razão, uma outra nomenclatura bastante usada para a distribuição de matéria e galáxias no universo é “teia cósmica”.

acessíveis em experimentos terrestres. Os principais mapeamentos do século XXI envolvem de centenas a milhares de cientistas, em muitos casos construindo novos telescópios e satélites dedicados exclusivamente a um grande projeto. Entretanto, as questões gerais que os mapeamentos de galáxias permitem abordar continuam semelhantes: quais são as propriedades da estrutura em grande escala do universo e o que elas nos dizem sobre sua natureza fundamental? Como se formam e evoluem as galáxias que observamos nessas escalas e como são afetadas pela evolução e estrutura cósmica?

O objetivo deste artigo é contar a história dos mapeamentos de galáxias, explorando em paralelo as questões científicas que motivaram seu desenvolvimento e o que pudemos aprender sobre as maiores escalas do universo e sobre as galáxias que ali existem. Ele não pretende ser uma historiografia rigorosa do tema e nem um artigo de revisão especializado das áreas de cosmologia ou astrofísica extragaláctica; sua ambição é contextualizar as grandes questões científicas das áreas de cosmologia e astrofísica extragaláctica, conforme estas foram sendo desenvolvidas e refinadas, e fornecer uma porta de entrada à literatura mais especializada.

2 Primeiros mapeamentos e o surgimento da astrofísica e da cosmologia

Embora a astronomia exista enquanto atividade humana desde o início da história documentada, é no século XX que surgem a astrofísica extragaláctica e a cosmologia moderna. A primeira surge como consequência da aplicação de novas ideias e técnicas da física às observações astronômicas, permitindo caracterizar as nebulosas espirais como objetos externos à Via Láctea, dentre muitos outros avanços. Já a segunda surge como uma das principais aplicações da teoria da relatividade geral formulada por Einstein em 1915, e sua primeira comprovação experimental se dá com a medida da velocidade de recessão de galáxias próximas, demonstrando a expansão cósmica. Esta seção aborda a história e os avanços dos mapeamentos de galáxias do século XIX ao fim da Segunda Guerra Mundial, detalhando desenvolvimentos fundamentais que estabeleceram

as bases para nosso entendimento moderno do universo e das galáxias nele existentes.

2.1 A pré-história dos mapeamentos de galáxias

A história dos mapeamentos de galáxias se inicia, por assim dizer, com a criação dos primeiros catálogos de nebulosas na virada do século XVIII ao XIX. Sob o risco de simplificar a história, pode-se argumentar que os dois principais personagens desta era são o astrônomo francês Charles Messier (1730-1817) e o astrônomo britânico de origem alemã William Herschel (1738-1822). O principal interesse científico do primeiro era a identificação e o estudo de cometas. Messier compilou e publicou em 1784 um catálogo de 103 objetos que poderiam atrapalhar observadores de cometas [2]. Algumas das galáxias mais próximas e conhecidas possuem até hoje, além de seu nome popular, números de identificação advindos deste primeiro catálogo. Por exemplo, a galáxia de Andrômeda, nossa grande vizinha, é também conhecida como M31.

Tendo se interessado por astronomia após uma carreira de músico e compositor, William Herschel (1738-1822) construiu alguns dos telescópios mais avançados para a época e, com eles, foi responsável por inúmeros progressos em astronomia, incluindo a descoberta de Urano, a detecção de radiação infravermelha e a caracterização de aglomerados de estrelas no catálogo Messier. Usando um de seus próprios telescópios, William Herschel e sua irmã Caroline Herschel (1750-1848) realizaram um levantamento sistemático do céu, descobrindo e catalogando milhares de nebulosas. Este trabalho foi iniciado no fim do século XVIII e continuado por Caroline, após a morte do irmão, e pelo filho de William, John Herschel (1792-1871). O catálogo final foi publicado pelos Herschels em 1864 com o nome de *Catálogo Geral de Nebulosas* [3]. Continuando este trabalho, John Dreyer (1852-1926), astrônomo e historiador da astronomia dinamarquês, produziu o *Novo Catálogo Geral de Nebulosas e Aglomerados de Estrelas* e mais catálogos suplementares ao longo dos anos. A versão final, de 1908, contém aproximadamente 15.000 nebulosas brilhantes, e até hoje o *New General Catalogue* — ou NGC, como é conhecido em inglês — é o catálogo mais importante de galáxias



Figura 1: Imagens da Galáxia do Redemoinho (*Whirlpool Galaxy*, em inglês) identificada como M51 no catálogo de Messier e como NGC 5194 no *New General Catalogue*. Esta galáxia foi a primeira nebulosa cuja estrutura espiral foi diretamente observada. (a) Ilustração original de Lord Rosse [1], feita à mão e observada com seu telescópio refletor privado de 72 polegadas. (b) Imagem moderna da mesma galáxia e sua companheira, NGC 5195, realizada com o telescópio Hubble. Crédito: NASA, ESA, S. Beckwith (STScI), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

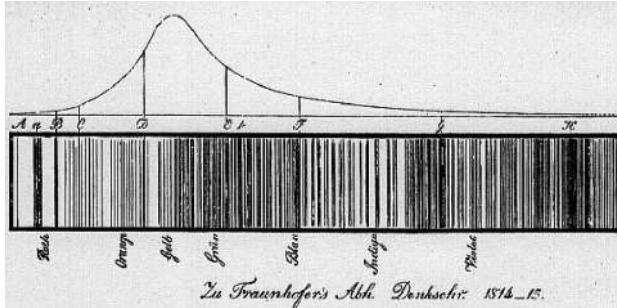


Figura 2: Ilustração de Fraunhofer baseada no espectro da luz solar observada com seu espectrógrafo [7]. A curva contínua representa a irradiância da luz solar em função de seu comprimento de onda (i.e. sua cor). As linhas escusas indicam valores do comprimento de onda para os quais a irradiância é suprimida. Estas linhas de absorção se devem à presença de diferentes elementos na atmosfera solar, por onde passa a luz advinda de seu núcleo.

brilhantes [4–6]. A Figura 1 mostra uma das galáxias mais conhecidas, a Galáxia do Redemoinho, presente tanto no catálogo de Messier quanto no NGC.

Desenvolvimentos tecnológicos de outras áreas também foram fundamentais para o progresso das observações astronômicas. Dentre eles, dois se destacam: a invenção da espectroscopia e da fotografia. Joseph Fraunhofer (1787-1826) e Gustav Kirchhoff (1824-1887) foram pioneiros na aplicação de técnicas de difração inventadas no início do século XIX. Com estas técnicas, foi possível caracterizar o espectro luminoso de fontes de radiação e, em experimentos terrestres, identificar as características de diferentes elementos e com-

postos. Em particular, linhas de emissão e absorção, que hoje sabemos serem causadas pelas transições de elétrons entre níveis orbitais, permitem identificar elementos de forma precisa. Ao apontar espectrógrafos para o Sol e outros objetos celestes, Fraunhofer pôde identificar e catalogar uma grande quantidade de linhas e de emissão e absorção. A Figura 2 mostra a ilustração original de Fraunhofer correspondendo ao espectro observado do sol, possuindo uma distribuição contínua correspondendo a um corpo negro e linhas de absorção representadas no retângulo inferior [7]. Ao longo das décadas subsequentes a estas primeiras medidas, Léon Foucault (1819-1868), Gustav Kirchhoff (1824-1887) e diversos outros cientistas catalogaram as linhas de emissão e absorção de diferentes fontes de luz. No início dos anos 1860, Kirchhoff publicou uma série de artigos analisando detalhadamente o espectro solar e descrevendo a composição química de sua atmosfera [8–10].

Para mapeamentos de galáxias modernos, uma das principais razões para a importância de se medir espectros de galáxias consiste em permitir uma medida direta do efeito Doppler. Este efeito, proposto pelo físico e matemático austriaco Christian Doppler (1803-1853) em 1842, ocorre quando a fonte de um sinal sonoro ou luminoso se encontra em movimento relativo a um observador [11]. O comprimento de onda do sinal recebido se reduz caso ambos estejam se aproximando e aumenta no caso contrário. No caso de objetos astronômicos, este efeito causa um deslo-

camento do comprimento de onda das linhas de emissão e absorção, permitindo assim uma medida indireta da velocidade do objeto. Esta técnica de medida se mostrou fundamental para a descoberta da expansão do universo em 1929.

O desenvolvimento de técnicas fotográficas foi também fundamental para o avanço da astronomia moderna. Antes da invenção do daguerreótipo e das placas fotográficas, astrônomos desenhavam à mão imagens dos objetos que observavam através dos telescópios. Com o surgimento e avanço de técnicas fotográficas cada vez mais sensíveis, foi possível obter imagens com precisão de detalhes além da capacidade de reprodução humana. Já o desenvolvimento de materiais químicos capazes de registrar a luz com muito mais eficiência fez aumentar consideravelmente a capacidade de observação de objetos invisíveis ao olho nu e mesmo aos telescópios mais potentes.²

Estes desenvolvimentos, culminando no fim do século XIX, montaram a cena para as grandes descobertas da astrofísica e cosmologia na primeira metade do século XX e para o surgimento dos primeiros mapeamentos de galáxias modernos.

2.2 A natureza das nebulosas e a medida de distâncias com estrelas Cefeidas

Na virada do século XIX para o século XX, a astronomia passou por uma revolução. Nos Estados Unidos, em particular, entrou-se na era dos grandes telescópios e observatórios controlados por universidades e financiados por doações de milionários industriais americanos. Novos instrumentos localizados nos recém-criados Observatório Lick (1888), Observatório Yerkes (1897), Observatório Monte Wilson (1904) e Observatório Lowell (1894)—e no mais antigo Observatório de Harvard College (1839)—foram responsáveis por grande parte das novas e cruciais descobertas da astronomia até 1949, quando o telescópio revolucionário de 200 polegadas do Observatório Palomar (1928) iniciou seu funcionamento. Antes do século XX, acreditava-se que a maior parte dos objetos celestes observados era parte da nossa galáxia. Ao chegarmos à metade do século, a expan-

²Foi também de extrema importância a invenção de novos mecanismos de movimentação dos telescópios para permitir o acompanhamento da rotação do céu e manter o telescópio apontado para um objeto específico [12].

são do universo e a natureza extragaláctica das nebulosas espirais eram fatos amplamente aceitos e verificados observationalmente, e os primeiros mapeamentos modernos de galáxias começavam a ser realizados.

O primeiro passo nessa trajetória consistiu na identificação da natureza extragaláctica das nebulosas, em particular as espirais. Nas duas primeiras décadas do século XX, os novos observatórios foram utilizados para mapear a distribuição de estrelas na galáxia—tentando assim determinar a sua estrutura—e para desvendar o mistério da natureza das nebulosas espirais, em particular o fato de que são uma classe de objetos que não se localiza no plano da galáxia. Em paralelo com o nascimento da astrofísica estelar, novos espectrógrafos, placas fotográficas e grandes telescópios foram combinados para identificar maneiras indiretas de medir distâncias absolutas a objetos distantes para os quais o efeito de paralaxe não pode ser usado.³ A teia de observações e evidências rapidamente se tornou complexa. Um debate entre William Shapley (1885-1972) e Heber Curtis (1872-1942), hoje conhecido como Debate Shapley-Curtis, buscou dar sentido às evidências existentes sobre o tamanho e a estrutura da Via Láctea e sobre a natureza das nebulosas espirais, sem chegar a um claro consenso.

Foram necessárias as observações de Edwin Hubble (1889-1953), em 1925, para decidir conclusivamente o debate. Hubble utilizou a técnica de medida de distância usando uma relação entre o período e a luminosidade de Cefeidas, estrelas variáveis presentes na Via Láctea e em galáxias próximas. Esta relação foi medida por Henrietta Leavitt (1868-1921), trabalhando como chefe do departamento de fotometria estelar fotográfica do Harvard College Observatory. Usando dados observados pela estação de observação de Arequipa, no Peru, Leavitt calibrou a relação período-luminosidade de Cefeidas próximas encontradas na Pequena Nuvem de Magalhães [13]. A medida do período de flutuação fornece assim uma medida indireta da sua luminosidade intrínseca, e a comparação desta última com

³Paralaxe estelar é a mudança aparente da posição de uma estrela no céu conforme a Terra orbita de um lado ao outro do Sol. Como conhecemos a distância da Terra ao Sol, é possível usar trigonometria básica para medir as distâncias até as estrelas próximas.

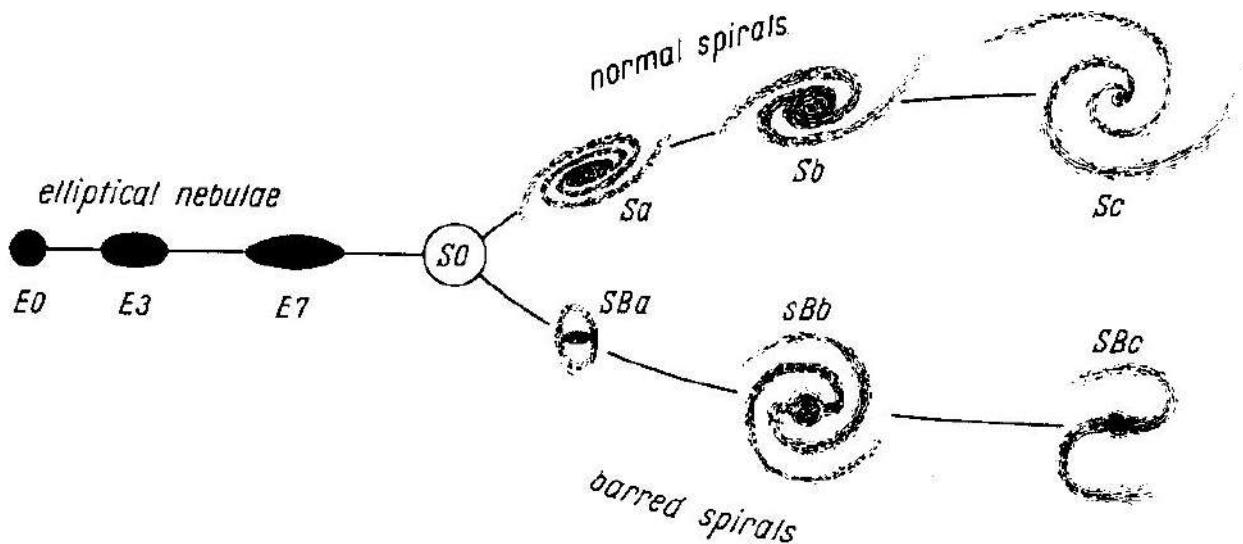


Figura 3: O diapasão de Hubble em sua versão original. As galáxias elípticas se encontram à esquerda. Os braços do diapasão se dividem em espirais normais e espirais barradas, com as diferentes letras se referindo às diferentes morfologias dos braços espirais.

a luminosidade aparente permite medir a distância à estrela.

Uma das nebulosas espirais mais proeminentes no céu é a nebulosa de Andrômeda. Um ponto controverso no debate sobre a natureza das nebulosas envolvia o valor da distância de Andrômeda ao Sistema Solar. Esta distância foi medida de várias formas nas primeiras décadas do século XX. Porém, devido a múltiplas discrepâncias, não havia consenso sobre este valor. A importância fundamental do trabalho de Hubble foi utilizar o telescópio Hooker de 100 polegadas do Observatório Monte Wilson para observar 12 Cefeidas em Andrômeda e 22 na galáxia do Triângulo (M33), um pouco mais distante. Hubble pode assim demonstrar conclusivamente que estas galáxias estavam a distâncias muito maiores do que o tamanho estimado da Via Láctea [14].

2.3 Classificação de galáxias, redshifts e a expansão do universo

Estes primeiros grandes resultados de Hubble não foram os únicos de importância fundamental produzidos por ele na década de 1920. Simultaneamente à publicação das distâncias das galáxias espirais, Hubble introduziu o seu sistema de classificação de galáxias em elípticas, lenticulares, espirais normais, espirais barradas e irregulares. Este sistema foi apelidado de diapasão de Hubble [15]. A Figura 3 mostra a primeira versão

do diapasão, publicada em seu famoso livro *O Reino das Nebulosas* [16]. Hubble interpretou as galáxias em seu sistema como estágios evolutivos percorridos pelas mesmas; embora esta interpretação tenha se mostrado errônea, o diapasão de Hubble mantém sua importância até hoje. Isto se deve ao fato de que a classificação proposta está correlacionada com uma série de características físicas das galáxias, tais como cor, taxa de formação estelar, idade, metalicidade, de forma que a tipificação morfológica de uma galáxia traz informações indiretas sobre os processos astrofísicos presentes nela. Pode-se argumentar que este é o ponto de partida da astrofísica extragaláctica.

Hubble realizou descobertas igualmente revolucionárias no campo da cosmologia. Para tanto, ele combinou as medidas de distâncias a galáxias próximas obtidas com Cefeidas e as medidas do efeito Doppler gerado pelas velocidades relativas destes objetos. Estas últimas haviam sido realizadas por Vesto Slipher (1875–1969) na década de 1910. Slipher, trabalhando com um novo espectrógrafo instalado no telescópio de 24 polegadas do Observatório Lowell, publicou em 1917 medidas espectroscópicas pioneiras de 25 nebulosas espirais [17]. Além de caracterizar a composição química destes objetos, as medidas revelaram que estas nebulosas possuíam grandes velocidades, muito maiores do que a de qualquer objeto já observado na Via Láctea. Mais importante,

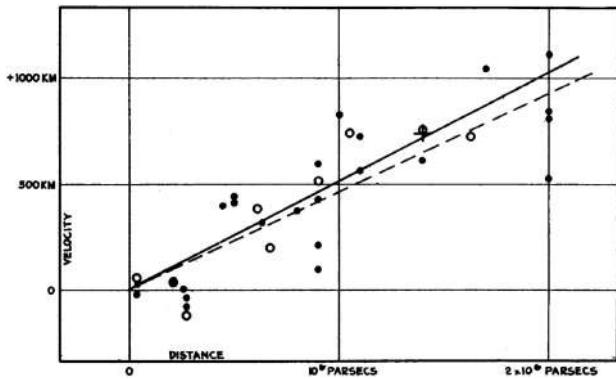


Figura 4: Primeira medida da lei de Hubble, mostrando a relação linear entre distância (em parsecs) e a velocidade de recessão de galáxias próximas. Pontos preenchidos e abertos representam diferentes métodos de análise e as retas preenchidas e tracejadas indicam o melhor ajuste estatístico em cada um dos casos.

grande parte destas galáxias possuía um desvio das linhas de absorção do espectro para comprimentos de onda maiores. Este efeito foi chamado de *redshift* (desvio para o vermelho, em inglês), o que indica que estão se afastando de nós.

Hubble baseou-se majoritariamente nestas medidas espectroscópicas e utilizou uma variedade de métodos, incluindo suas medidas de distância com Cefeidas, para demonstrar uma relação linear entre a distância e a velocidade de recessão das galáxias [18], como mostrado na Figura 4. Este efeito é previsto pelos modelos cosmológicos homogêneos e isotrópicos baseados na Relatividade Geral; as medidas de Hubble—tanto no artigo original quanto em um trabalho subsequente com Milton Humason (1891–1972) [19]—forneceram uma confirmação estrondosa destes modelos. Esta relação linear é até hoje conhecida como Lei de Hubble, e forneceu a base para o desenvolvimento do modelo cosmológico padrão.

Hubble continuou refinando suas observações e investigando as propriedades das galáxias e sua distribuição no universo. Dentre os resultados mais importantes (e talvez menos conhecidos), ele percebeu que poderia usar a distribuição de galáxias para testar a hipótese de homogeneidade e isotropia na qual o modelo cosmológico padrão se baseia. A suposição de que as galáxias estão distribuídas de maneira estatisticamente homogênea e isotrópica implica em uma relação entre a sua magnitude aparente e seus *redshifts*. Até os limites de luminosidade mais fracos que conseguiu atingir, Hubble não detectou nenhum desvio

da homogeneidade e isotropia aproximados, realizando assim um dos primeiros mapeamentos de galáxias e obtendo uma das primeiras verificações observacionais das hipóteses básicas do modelo cosmológico [16].

Em seus últimos anos de vida, Hubble planejou publicar um grande atlas ilustrando os diferentes tipos e características de galáxias. Embora não tenha conseguido completar esta empreitada, seu último assistente e também grande astrônomo, Allan Sandage (1926–2010), processou os dados já recolhidos e publicou o *Hubble Atlas of Galaxies* [20]. Em paralelo à criação do Atlas de Galáxias de Hubble, Gérard de Vaucouleurs (1918–1995), Halton Arp (1927–2013) e outros astrônomos publicaram uma série de catálogos e atlas de galáxias cujo objetivo era caracterizar de forma minuciosa os diferentes tipos de galáxias, suas cores, morfologias, propriedades espectroscópicas e tipologia. Simulações detalhadas das interações entre duas galáxias permitiram reproduzir uma variedade de morfologias exóticas de galáxias irregulares, iniciando assim um processo de comparação de previsões teóricas e simulações com a variada fenomenologia observada nos mapeamentos de galáxias da época [21].

3 Avanços do pós-guerra

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, a astrofísica e a cosmologia passaram por uma transformação radical. O advento da radioastronomia gerou vários avanços, permitindo realizar pela primeira vez grandes mapeamentos de fontes de rádio, medir a radiação cósmica de fundo e obter evidências sobre a existência de matéria escura a partir de curvas de rotação de galáxias espirais próximas. Em paralelo, avanços tecnológicos e computacionais revolucionaram o design de telescópios ópticos, coleta de dados, análise e modelagem teórica, permitindo comparações precisas entre teoria e observação. Alguns grandes mapeamentos de galáxias foram realizados, e a aplicação de técnicas estatísticas para a caracterização da distribuição de galáxias nas maiores escalas inaugurou um novo paradigma na cosmologia. De um ponto de vista astrofísico, as observações, combinadas a simulações numéricas, permitiram investigar os diferentes processos influenciando a

formação e evolução de galáxias, incluindo a descoberta de halos de matéria escura envolvendo as galáxias. Adicionalmente, simulações cosmológicas demonstraram a necessidade de matéria escura fria para explicar a estrutura em grande escala observada. Ao fim da década de 1980, a compreensão moderna da estrutura em grande escala do universo se estabeleceu firmemente, assim como os mecanismos básicos responsáveis pelos processos de formação e evolução de galáxias. Nesta seção, exploraremos estes diferentes desenvolvimentos.

3.1 Levantamentos de rádio

As primeiras observações astronômicas na faixa do rádio—motivadas parcialmente pela busca de fontes de interferência na transmissão de emissões em rádio popularizadas nas décadas de 1920 e 1930—foram realizadas por Karl Jansky (1905-1950) e Grote Reber (1911-2002). Estas observações permitiram identificar a Via Láctea como uma fonte de emissão de rádio, de mecanismo físico ainda desconhecido [22, 23]. Com o desenvolvimento e uso de radares em aplicações militares, um grande esforço de guerra buscou refinar técnicas para identificar fontes de ruído e degradação do sinal. O fim da Segunda Guerra Mundial trouxe estes avanços para as aplicações civis, revolucionando a radioastronomia. Enquanto até então os levantamentos de galáxia se davam essencialmente com observações de telescópios ópticos, o pós-Guerra se caracterizou como uma época de abertura do espectro eletromagnético. No caso particular da faixa do rádio, inúmeros avanços científicos foram obtidos, tais como a descoberta de quasares e pulsares, a medida de curvas de rotação de galáxias com a emissão do hidrogênio neutro e a primeira medida da radiação cósmica de fundo prevista pelos modelos térmicos do universo primordial [12].

No contexto específico de mapeamentos de galáxias, as observações de rádio tiveram um papel importante na contestação dos modelos cosmológicos de estado estacionário propostos na década de 50 e 60 [24]. Levantamentos de galáxias com radiotelescópios, liderados por Martin Ryle (1918-1984) em Cambridge, na Inglaterra e Bernard Mills (1920-) em Sydney, na Austrália, realizaram medidas da contagem de galáxias

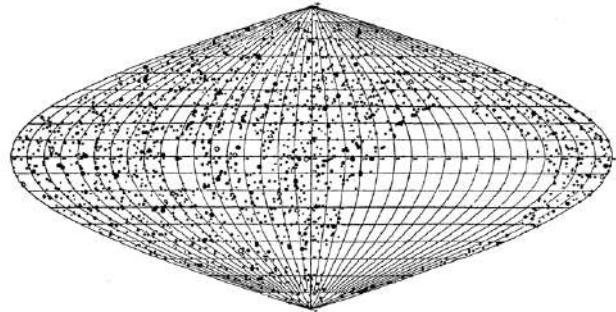


Figura 5: Fontes identificadas no *Second Cambridge Catalog of Radio Sources* [25]. O catálogo contém quase duas mil fontes de emissão na faixa de rádio de 82 MHz. A maioria das fontes é extragaláctica, mas há detecções espúrias e alguns objetos locais, o que gerou erros sistemáticos nos resultados originais obtidos com este catálogo. Estes erros foram corrigidos em edições subsequentes do catálogo de Cambridge.

em função de seu fluxo observado e obtiveram resultados discrepantes para esta dependência. A Figura 5 mostra um dos catálogos de fontes de rádio—including tanto galáxias quanto fontes contaminantes—gerado por Ryle e seus colaboradores [25]. Após alguns anos de controvérsia e refinamento das técnicas observacionais, chegou-se à conclusão que estas contagens não eram compatíveis com o modelo cosmológico do estado estacionário. Em 1965, poucos anos após estas medidas, a primeira observação da radiação cósmica de fundo por Penzias e Wilson [26], também usando um radiotelescópio, deu suporte ao modelo do Big Bang, enterrando definitivamente o modelo do estado estacionário. O excesso de galáxias em baixas luminosidades e suas possíveis causas continua sendo um tema de pesquisa ativo, envolvendo a possível evolução nas populações de fontes e em suas propriedades astrofísicas [27]. A questão da homogeneidade e isotropia estatísticas em grande escala do universo continua sendo analisada até hoje, sem nenhuma evidência que conteste esta hipótese [28].

3.2 Estatística da distribuição de galáxias com levantamentos ópticos

Enquanto os primeiros levantamentos de rádio forneciam suporte adicional à homogeneidade e isotropia aproximada da distribuição de galáxias no universo, levantamentos na faixa do óptico conduziam um novo programa de observações ambiciosas. Dentre os novos levantamentos, o

Lick Northern Proper Motion Surveys, realizado no Observatório Lick, foi o mais importante. Seu objetivo primário era medir os movimentos de estrelas próximas, mas Donald Shane (1895-1983) e Carl Wirtanen (1910-1990) realizaram um programa ambicioso para catalogar mais de um milhão de galáxias brilhantes em todo o céu visível do hemisfério norte [29]. A partir deste catálogo, cientistas pioneiros—Jerzy Neyman e Elisabeth Scott [30–32], Limber [33, 34], Rubin [35]—iniciaram um programa de medição das correlações estatísticas espaciais na distribuição de galáxias em grande escala.

Para entender a lógica por trás desta abordagem, é necessário ter em mente que o processo de geração da estrutura em grande escala do universo possui natureza intrinsecamente aleatória. Isto se deve tanto às perturbações iniciais no universo—geradas por flutuações quânticas—quanto ao crescimento aleatório destas perturbações e consequente formação de galáxias. Não é possível construir um modelo determinístico para a posição de cada galáxia individual no universo. Podemos, porém, interpretar a homogeneidade e isotropia do universo como propriedades estatísticas e definir a função de correlação de galáxias como a função que fornece a probabilidade conjunta de que duas galáxias quaisquer estejam a uma separação r uma da outra. Esta é uma das possíveis funções estatísticas, dentre outras, que podemos definir para obter informações sobre os desvios da distribuição de galáxias no universo de um processo puramente aleatório sobre um fundo homogêneo e isotrópico [36].

Ao longo da década de 60 e 70, o estudo estatístico da distribuição em grande escala de galáxias e o desenvolvimento de modelos teóricos para o crescimento de estruturas no universo (i.e. perturbações cosmológicas) caminharam lado a lado. Do ponto de vista teórico, grupos liderados por Jim Peebles (1935-) e Yakov Zel'dovich (1914-1987) desenvolveram pela primeira vez modelos para as anisotropias na radiação cósmica de fundo e para o crescimento das perturbações fractionárias na densidade de matéria [12, 40]. Do ponto de vista observational, buscou-se principalmente caracterizar o comportamento da função de correlação de galáxias: há alguma escala preferencial que demonstra mais aglomeração? Há alguma forma matemática relativamente simples

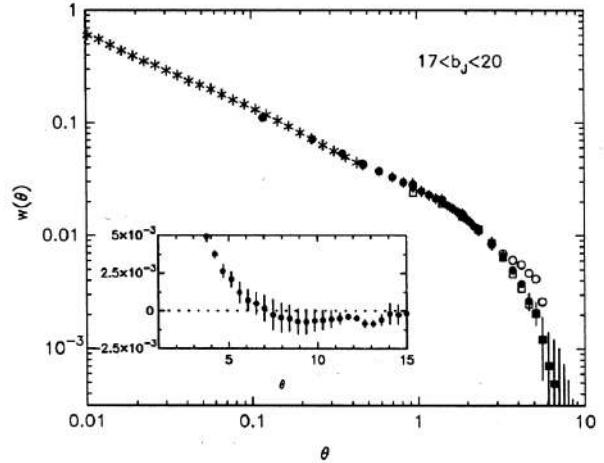


Figura 6: Análise estatística do mapa de galáxias observado pelo UK Schmidt Telescope, localizado no Observatório Siding Spring, na Austrália. Suas placas fotográficas foram escaneadas pelo sistema SERC Automated Plate Measuring da Universidade de Cambridge. O mapa do céu mostra a distribuição projetada de galáxias em uma grande área do hemisfério sul celeste. A medida da função de correlação angular $w(\theta)$ mostra que, para ângulos de separação pequenos ($\theta \in [0.01, 1]$), a correlação estatística de galáxias segue uma lei de potência [37].

para este observável? Descobriu-se que, em escalas relativamente pequenas, a função de correlação segue uma lei de potência. Isto indica que a aglomeração ocorre nas mais variadas escalas, desde pequenos grupos de galáxias até grandes aglomerados de galáxias. Em outras palavras, dada a posição de uma galáxia, há uma tendência maior de que haja outras próximas. O mesmo vale para aglomerados de galáxias. Estas conclusões se mantêm estáveis para diferentes amostras de brilho aparente mais forte ou mais fraco, o que indica que a tendência à aglomeração é estável no universo próximo de nós [37]. A Figura 6 mostra uma análise dos anos 1990 revisitando os resultados inicialmente obtidos nas décadas de 1950 a 1980. Embora a ausência de espectros impedissem a medida das posições tridimensionais de galáxias no universo, a distribuição projetada na esfera celeste pode ser comparada com a expectativa gerada por uma distribuição estatística cuja correlação espacial não varia com a distância à nossa galáxia. Uma série de análises, em particular de Peebles e colaboradores, refinaram a medida de diversas propriedades estatísticas dos mapeamentos de galáxia da época. Uma das principais fontes para se aprofundar neste sub-tópico

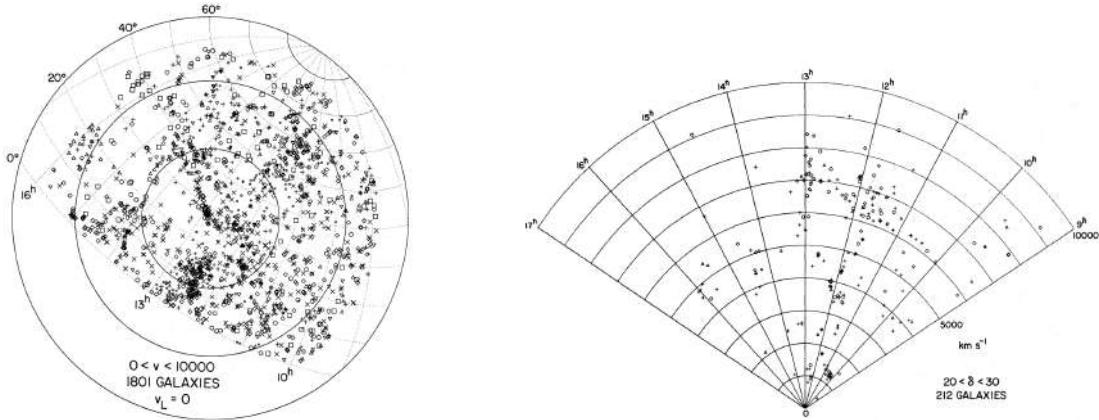


Figura 7: Distribuição de galáxias medidas pelo CfA/Harvard Redshift Survey [38, 39] (a) Distribuição de todas as galáxias com medidas de *redshifts* espectroscópicos localizadas no hemisfério norte celeste. (b) Projeção de uma fatia de latitudes $20^\circ < \delta < 30^\circ$ em coordenadas de ascensão reta (i.e. longitude) e de velocidade de recessão (i.e. *redshift*).

é o livro escrito por Peebles ao fim da década, *The Large Scale Structure of the Universe* [41].

Os resultados descritos acima baseiam-se na análise da distribuição projetada de galáxias diretamente das placas fotográficas. A revolução digital da década de 70 propiciou a realização de levantamentos de galáxias tridimensionais, em que medidas espectroscópicas fornecem a distância radial das galáxias por meio de seus *redshifts*. Para que fosse possível medir espectros de centenas ou milhares de galáxias de brilho fraco e analisá-los de forma robusta, foi necessário o desenvolvimento de detectores digitais acoplados aos espectrógrafos existentes, software especializado para as análises de dados digitais e o uso de grande parte das horas de observação em telescópios modernos. No Observatório de Tartu, na Estônia, Jaan Einasto (1929-) e colaboradores foram os primeiros a medir correlações estatísticas em escalas maiores do que as de aglomerados de galáxias [42]. Quase concomitantemente, Marc Davis (1947-) iniciou em Harvard um projeto para realizar o maior mapeamento espectroscópico de galáxias já existente. Sua ideia foi usar o telescópio do Monte Hopkins, Arizona, de propriedade do Centro de Astrofísica da Universidade de Harvard (CfA/Harvard). Com amplo suporte financeiro do CfA, Davis e seus colaboradores desenvolveram a instrumentação e os códigos necessários para realizar um mapeamento de aproximadamente 2400 galáxias, número até então sem precedentes. O *CfA Redshift Survey* criou pela primeira vez um mapa da estrutura filamentar em grande escala do universo, como

mostrado na Figura 7 [38, 39]. Além de revelar de maneira clara a chamada teia cósmica, o CfA foi fundamental para mostrar que as simulações cosmológicas da época, ainda incipientes, não eram compatíveis com as observações. Para resolver este enigma, Davis e um grupo de jovens especialistas em simulações se juntaram em Berkeley e desenvolveram as primeiras grandes simulações cosmológicas, tema que discutiremos em mais detalhes na próxima seção.⁴

3.3 Matéria escura

Voltando um pouco no tempo, os primeiros indícios da existência de algum tipo de matéria escura astrofísica foram identificados já na década de 1930 por Fritz Zwicky. Trabalhando com dados de aglomerados de galáxias do telescópio Palomar, Zwicky usou o efeito Doppler nas medidas espectroscópicas de galáxias para medir a dispersão de velocidades nestes aglomerados. Modelando esta quantidade em termos do teorema do virial (i.e. conservação de energia cinética e potencial), Zwicky percebeu que, para obter as velocidades observadas, era necessário que muito mais matéria além da visível estivesse presente naquela região [43].

Com o surgimento de novos grandes mapeamentos de galáxias, as observações permitiram criar alguns dos primeiros catálogos de grupos e aglomerados de galáxias, tal como o célebre catálogo Abell. A primeira versão deste catálogo

⁴Um artigo biográfico de Marc Davis contém um relato detalhado da história destes desenvolvimentos.

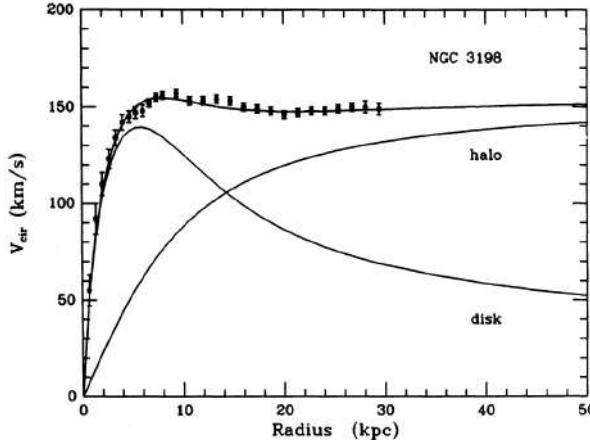


Figura 8: Curva de rotação da galáxia NGC 3198 obtidas a partir da emissão de hidrogênio neutro HI na faixa do rádio. O ajuste inclui a contribuição devido ao halo de matéria escura (“halo”) e à componente estelar visível na faixa do óptico (“disk”) [45].

foi compilada por George O. Abell para sua tese de doutorado em 1957, a partir de dados do National Geographic Survey - Palomar Observatory Sky Survey (POSS). Dentre os resultados obtidos na tese e publicados em forma de artigo no ano seguinte [44], mostrou-se que aglomerados de galáxias não se distribuem de forma puramente aleatória no céu, uma das primeiras evidências de estrutura em escalas da ordem de dezenas de Mpc. O catálogo de Abell é um dos principais precursores dos estudos na área de aglomerados de galáxias, que hoje entendemos como objetos coesos formados por um halo de matéria escura preenchido por gás difuso e semeado por dezenas ou até centenas de galáxias.

Porém, embora o conceito de matéria escura tenha sido introduzido no estudo de aglomerados de galáxias, as evidências que convenceram a comunidade da existência de matéria escura vieram da análise das curvas de rotação de galáxias espirais. Estas curvas descrevem o valor da velocidade de rotação do gás e estrelas em função da distância ao centro da galáxia. Supondo-se que toda a matéria presente na galáxia seja visível, espera-se que a curva de rotação atinja um valor de velocidade máxima e, em seguida, decaia continuamente conforme nos afastamos de seu centro [47, cf. seção 2.3(g)]. Medidas destas curvas já vinham sendo realizadas desde o início do século para caracterizar a cinemática das galáxias espirais; a possível existência de grandes densida-

des de matéria não-luminosa era especulada, embora diversos outros possíveis efeitos observacionais confundissem as interpretações [12]. Avanços na capacidade de radiotelescópios e o desenvolvimento de novos instrumentos permitiram realizar observações da emissão de hidrogênio neutro (HI) e caracterizar de forma detalhada as curvas de rotação de galáxias próximas [48, 49]. Estas observações mostraram que a curva de rotação se mantém aproximadamente constante a partir do ponto em que atinge o seu máximo, estendendo-se até grandes distâncias do centro da galáxia. Embora haja outras possíveis explicações para este tipo de curva, uma hipótese é a de que exista uma grande quantidade de matéria escura distribuída em um grande halo em torno da parte visível da galáxia [50, 51]. Esta ideia foi sustentada de maneira convincente por diversas novas medidas, sobretudo a realizada por Vera Rubin, Robert Ford e Norbert Thonnard em 1980 [52]. A Figura 8 mostra uma medida precisa realizada por van Albada, Bahcall e colaboradores em 1985, mostrando claramente a contribuição do halo de matéria escura ao perfil de velocidades tangenciais [45].

Em paralelo a estes desenvolvimentos, estudos cosmológicos avançavam cada vez mais na descrição teórica de flutuações de matéria e energia em torno do fundo cosmológico homogêneo e isotrópico [12, 40]. Estes estudos demonstraram que, caso toda a densidade de matéria esperada para o universo estivesse em forma bariônica, as flutuações cosmológicas deveriam deixar uma assinatura na radiação cósmica de fundo que ainda não havia sido detectada. Ao fim da década de 70, múltiplas observações de diferentes fenômenos em diferentes regimes pareciam indicar a existência de matéria escura, embora não houvesse candidatos astrofísicos capazes de dar conta de toda a fenomenologia existente.

Neste contexto, simulações cosmológicas da estrutura em grande escala do universo contribuíram decisivamente a fazer pender a balança para o lado da existência de matéria escura. Com o aumento do poder de cálculo dos computadores da época, tornou-se possível realizar simulações da interação gravitacional entre partículas de matéria (conhecidas como simulações de N-corpos) em número cada vez maior, incluindo também os efeitos da expansão do fundo cosmológico. Os pri-

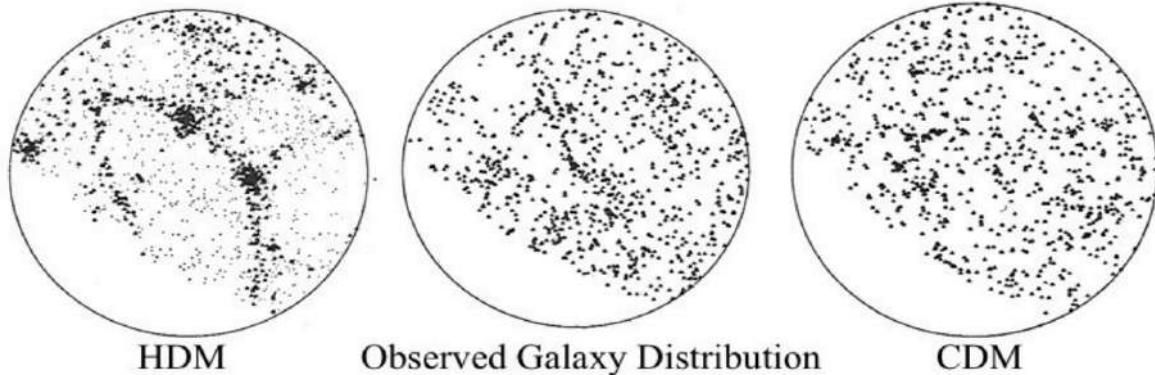


Figura 9: Comparação de simulações da distribuição de galáxias no universo próximo com observações. Modelos de matéria escura quente (HDM, esquerda) e de matéria escura fria (CDM, direita) são comparadas com dados do CfA/Harvard Redshift Survey (centro, comparar com a Figura 7). As simulações mostram de forma clara que a matéria escura fria é necessária para descrever corretamente a estrutura em grande escala do universo [46].

meiros resultados, obtidos na virada da década de 1970 para 1980, não reproduziam a estrutura filamentar sendo observada com cada vez mais detalhes na mesma época [53]. Medidas da massa de neutrinos da ordem de 30 eV [54] (erradas, como se soube depois!) motivaram a hipótese de que a estrutura em grande escala seria permeada por uma grande quantidade de matéria escura quente na forma de neutrinos, onde a palavra quente se refere ao fato de que neutrinos possuem velocidades relativísticas durante grande parte da história do universo. Simultaneamente, novas teorias na área da física de partículas, em particular o desenvolvimento de modelos supersimétricos e a proposta de novas partículas tais como o *axion* e o *photino*, trouxeram a ideia de que uma destas partículas poderia compor uma forma de matéria escura fria (CDM, de *cold dark matter*) [55]. Com avanços no poder de cálculo dos computadores da época e o desenvolvimento de novas ideias e algoritmos para os códigos numéricos, foi possível produzir uma variedade de simulações com diferentes parâmetros cosmológicos e modelos para as propriedades de uma hipotética matéria escura. Marc Davis, instigador e líder do CfA Galaxy Survey, havia obtido uma posição permanente na Universidade de Berkeley. Davis e um grupo de colaboradores que ficou conhecido como *gang of four* (a gangue dos quatro) mostraram inicialmente que as observações não eram compatíveis com a existência de matéria escura quente [56]. Em um artigo subsequente [57], o grupo mostrou que simulações incluindo matéria

escura fria—mediante algumas hipóteses adicionais sobre a relação entre a distribuição de galáxias e de halos de matéria escura—reproduziam acuradamente grande parte das propriedades observadas da estrutura em grande escala. A Figura 9 mostra uma comparação entre simulações com matéria escura fria ou quente e as observações, demonstrando claramente a preferência pela primeira. No espaço de alguns anos, o grupo continuou produzindo novas simulações e resultados, refinando nossa compreensão do papel da matéria escura na formação da estrutura em grande escala do universo.

O conjunto de observações astrofísicas, mapeamentos de galáxias, simulações cosmológicas e novos conceitos advindos da física de partículas convergiram ao longo da década de 1970 e 1980 para criar um novo paradigma em que a matéria escura se torna uma componente fundamental do universo e um tipo de matéria cujas propriedades buscamos desde então desvendar por meio dos mais variados tipos de experimentos, observações e modelos. Neste processo, os mapeamentos de galáxias foram de importância fundamental.

Para uma história mais completa do desenvolvimento das observações e do conceito de matéria escura, indicamos ao leitor relatos especializados [12, 40, 58, 59].

3.4 Processos astrofísicos e correlações estatísticas

Além de atacar questões sobre as propriedades fundamentais do universo e a natureza da matéria nele existente, mapeamentos de galáxias também permitem investigar questões sobre a natureza das galáxias e sua relação com a estrutura em grande escala do universo, tais como: qual é a distribuição estatística das propriedades das galáxias? Como os diferentes ambientes locais podem influenciar as propriedades das galáxias que ali se formam e evoluem? Dentre os mecanismos físicos que geram correlações, quais se devem à física interna à cada galáxia ou aos efeitos dos ambientes locais na formação e evolução das mesmas?

Uma das primeiras questões envolve a variedade morfológica e de cor descrita no diapasão de Hubble. A primeira hipótese na sua construção é que estas galáxias representavam diferentes estágios de uma única evolução unificada. O acúmulo de observações na segunda metade do século XX descartou esta interpretação simplificada. Dentre as evidências em favor de modelos mais complexos, as primeiras simulações numéricas de colisões de galáxias, geradas pelos irmãos Alar (1937-) e Juri Toomre (1940-) mostraram que morfologias irregulares das mais variadas podem resultar destas colisões [21]. Outro tipo de processo, ligado à presença de gás em aglomerados de galáxias, é conhecido pelo nome de *ram pressure stripping* [60]. Neste processo, o gás intra-aglomerado expulsa gás de dentro de galáxias espirais que estejam em movimento dentro do aglomerado, favorecendo a criação de galáxias lenticulares, encontradas com muito mais frequência em aglomerados de galáxias [61, 62]. Ambos os processos, além de alterar a morfologia das galáxias, causam um grande aumento na taxa de formação estelar, um dos fenômenos mais importantes na evolução das galáxias. Estes resultados, dentre outros, enfatizaram a importância da compreensão do efeito do ambiente—na forma de halos de matéria escura de diferentes massas—e das interações entre galáxias nos processos de formação e evolução destes objetos.

Questões sobre a distribuição de luminosidades de galáxias também surgem com a realização de mapeamentos cada vez maiores. A luminosidade de uma galáxia—em uma dada faixa do

espectro—é uma de suas propriedades mais evidentes. Há uma enorme faixa de luminosidades absolutas observadas nas galáxias em nosso universo. Uma pergunta imediata é: qual é a distribuição estatística destas luminosidades? Em termos mais corriqueiros: há mais galáxias muito brilhantes ou menos brilhantes? Ou há uma quantidade igual delas? E como a luminosidade de uma galáxia se correlaciona com outras propriedades, tais como seu tipo, sua taxa de formação estelar, seu tamanho, etc? Para responder a este tipo de pergunta, podemos introduzir o conceito de função de luminosidade. Esta função descreve, grosso modo, a quantidade de galáxias por faixa de luminosidade num dado volume finito do universo. Uma função que cresce com a luminosidade, por exemplo, indica que há mais galáxias muito luminosas do que galáxias pouco luminosas. A função de luminosidade pode, em princípio, depender do tipo de galáxia que se está observando, do tipo de ambiente em que se encontra um dado volume e da idade do universo na época.

Na década de 70, um importante trabalho de Paul Schechter (1948-) propôs uma forma universal para a função de luminosidade [63]. Esta função nos diz que há muitas galáxias de baixa luminosidade absoluta no universo, que seu número decai lentamente até uma certa luminosidade característica e, a partir deste ponto, as galáxias mais luminosas se tornam exponencialmente raras. A função de Schechter é uma das ferramentas mais importantes da astrofísica extragaláctica, pois permite descrever as propriedades da população de galáxias no universo com poucos parâmetros e ao mesmo tempo, investigando possíveis variações nestes parâmetros ao longo do tempo cósmico, e identificar em grandes populações efeitos de formação e evolução de galáxias [47].

Como discutido no início desta seção, mecanismos físicos de formação estelar, distribuição de gás e poeira, dinâmica gravitacional, entre outros, são responsáveis por correlações entre observáveis de cada galáxia. Relações deste tipo são de natureza estatística e, por isso, é necessário um número importante de objetos para caracterizá-las. Com os avanços tecnológicos e aumento do volume de observações ao longo da segunda metade do século, foi-se tornando possível identifi-

car e caracterizar empiricamente relações deste tipo. Para galáxias elípticas, existe uma correlação entre a luminosidade intrínseca e a dispersão de velocidades na região central da galáxia, medida inicialmente por Sandra Faber (1944-) e Richard Jackson (1949-) e assim batizada de relação de Faber-Jackson [64]. Esta relação é um caso particular de uma relação mais geral incluindo o brilho superficial das galáxias, conhecida como plano fundamental e medida uma década mais tarde [65, 66]. Já no caso de galáxias espirais, Brent Tully (1943-) e Richard Fisher (1943-) mediram uma relação entre a largura da linha de emissão de 21cm do hidrogênio e a luminosidade absoluta das galáxias. Esta relação, conhecida como relação de Tully-Fisher, é válida com maior ou menor grau de ruído dependendo da banda de observação [67]. Além de indicarem correlações físicas que podem ser usadas como evidência para o estudo de modelos de formação e evolução de galáxias, estas relações também podem ser importantes para estudos cosmológicos: comparando a estimativa da luminosidade intrínseca com a luminosidade aparente destes objetos, é possível medir a sua distância e assim vincular as propriedades do universo, de forma similar ao feito originalmente por Hubble.

O aumento do volume e qualidade das observações também permitiu investigar questões teóricas ligadas à interação de galáxias com o seu ambiente—em particular, aglomerados de galáxias. Um dos primeiros exemplos é a proposta teórica do mecanismo de *violent relaxation* por Donald Lynden-Bell (1935-2018) [68]. Originalmente, o modelo foi proposto para explicar como sistemas de estrelas entram em equilíbrio estatístico sob a presença de um potencial gravitacional variando rapidamente no tempo. Porém, ele é igualmente válido—em primeira aproximação, considerando as galáxias como puntiformes—para modelar o efeito da formação de um aglomerado nas galáxias ali presentes. Com isto, é possível prever a distribuição de velocidades de galáxias no halo de matéria escura do aglomerado de galáxias, assim como o fato de que as galáxias mais massivas se encontram no centro do aglomerado. Efeitos adicionais devido a forças de maré aceleram a fusão entre galáxias grandes e pequenas, e criam galáxias massivas centrais com luminosidade e morfologia atípicas. Modelos deste

tipo foram propostos para explicar observações, sendo subsequentemente verificados em simulações [69–71].

Estes são apenas alguns dos efeitos ambientais e correlações estatísticas que os mapeamentos de galáxias em grande escala permitem observar. Embora já fosse possível desenvolver modelos sofisticados de processos físicos na formação e evolução de galáxias, o volume de dados em mapeamentos de galáxias ainda era comparativamente pequeno. Os grandes mapeamentos e simulações das décadas seguintes alteraram radicalmente o panorama.

4 A era dos grandes mapeamentos

4.1 Novas tecnologias e astronomia em grande escala

Avanços tecnológicos iniciados nas décadas de 60 e 70 começaram a render frutos na passagem à década de 1990. A primeira etapa foi o planejamento e construção dos grandes telescópios de 4 metros em alguns dos melhores sítios de observação no mundo, principalmente no Chile e no Havaí. Estes novos telescópios começaram a ser equipados com câmeras digitais usando a tecnologia de detectores eletrônicos de silício (CCDs), originalmente desenvolvida na indústria televisiva e em aplicações militares [12]. Em paralelo, o telescópio espacial Hubble foi projetado, construído e finalmente lançado no início dos anos 1990.⁵ Embora não tenha sido o primeiro telescópio espacial na faixa do óptico, o Hubble possuía um espelho maior e detectores muito mais avançados, permitindo observações de qualidade nunca antes obtida. Ao entrarem em operação, estes telescópios terrestres e espaciais tiveram impacto direto nos mapeamentos de galáxias, em particular na faixa do óptico; começa a era dos telescópios cunitários, operados por astrônomos residentes profissionais, e com tempo de observação acessível à comunidade geral. Além da democratização do acesso a instrumentos de ponta, a entrada na nova era digital gerou um salto na velocidade de coleta e na qualidade dos dados obtidos, abrindo novas janelas para a exploração do cosmos. Estes efeitos foram plenamente sentidos a partir dos

⁵<https://hubblesite.org/home>

anos 2000, com uma explosão de mapeamentos de galáxias de médio porte, cada um reunindo dezenas de astrônomos em colaborações internacionais.

Uma nova área de pesquisa usando o lenteamento gravitacional como observável astronômico surgiu graças a estes desenvolvimentos. O lenteamento gravitacional causado pela estrutura em grande escala do universo ocorre quando a luz de galáxias distantes passa por regiões do espaço que contêm grandes concentrações de matéria. A matéria distorce o espaço-tempo, fazendo com que a luz sofra ligeiros desvios de sua trajetória retílinear. Como resultado, as imagens das galáxias distantes são sutilmente distorcidas, um efeito conhecido como cisalhamento. Embora essas distorções sejam geralmente muito pequenas para serem observadas em galáxias individuais, elas podem ser detectadas estatisticamente ao medir as formas de milhões de galáxias [72]. Este cisalhamento cósmico foi observado pela primeira vez no ano 2000 [73–76], e tornou-se desde então uma das sondas cosmológicas mais importantes, graças à sua capacidade de vincular diretamente a amplitude das flutuações de matéria no universo—incluindo a matéria escura. A Figura 10 mostra uma representação idealizada do cisalhamento cósmico. O lenteamento gravitacional também é uma ferramenta fundamental na escala de aglomerados de galáxias e de galáxias individuais, permitindo sondar diretamente a estrutura dos halos de matéria escura nos quais as galáxias residem.

Os avanços descritos acima se referem especificamente a observações com filtros de banda larga na faixa óptica do espectro. Para obter informações precisas sobre a posição tridimensional das galáxias, é necessário realizar medidas espetroscópicas. Até a década de 1990, medir espetros ainda era extremamente custoso. O próximo avanço veio com a invenção de espectrógrafos multi-objeto, permitindo que telescópios observassem simultaneamente espetros de centenas de galáxias. Com este aumento dramático na eficiência, tornou-se possível realizar mapeamentos espetroscópicos contendo centenas de milhares de galáxias. No início dos anos 2000, dois novos grandes mapeamentos de galáxias expandiram radicalmente a nossa visão da estrutura em grande escala. O 2dF Galaxy Redshift Survey (2dF-

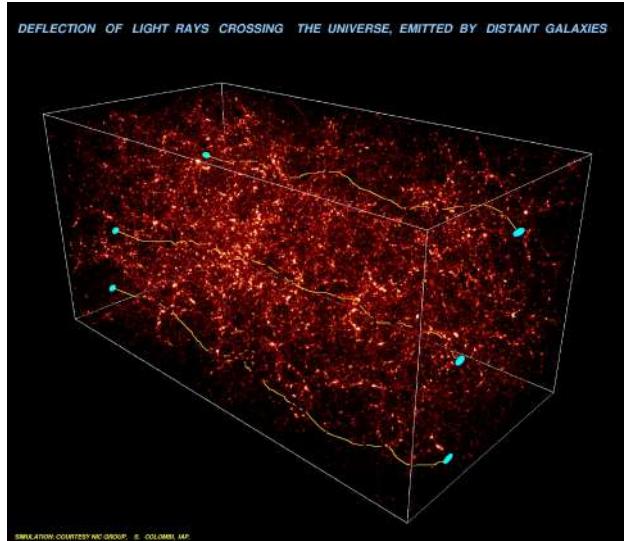


Figura 10: Representação esquemática do efeito de cisalhamento cósmico. Credit: S. Colombi, IAP,

GRS) [77] obteve uma amostra de quase 250.000 objetos, entre galáxias e quasares, cobrindo uma região de tamanho moderado no céu com maior profundidade e sem efetuar nenhum tipo de pré-seleção. O Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [78], por outro lado, observou uma área maior do céu a uma profundidade menor e selecionando galáxias vermelhas, cujo espectro permite medidas de *redshift* com mais facilidade. A Figura 11 mostra a estrutura em grande escala observada por ambos os levantamentos e comparada com simulações cosmológicas reproduzindo os mesmos tipos de seleções observacionais. Esta comparação demonstra cabalmente que os modelos de formação de estruturas implementados nas simulações de n-corpos são qualitativamente acurados e confirmam a estrutura filamentar a enormes distâncias.

O desenvolvimento de mapeamentos de galáxias no século XXI continuou seguindo uma trajetória de criação de novos instrumentos mais avançados, instalados em alguns dos telescópios de 4 metros existentes. Porém, o modelo de organização destes projetos evoluiu para a criação de grandes colaborações de centenas de cientistas. Estas colaborações, em troca da construção e instalação de instrumentos novos nos telescópios já existentes, ganham acesso privilegiado ao instrumento durante seus primeiros anos de operação, realizando assim grandes mapeamentos de galáxias que seriam inviáveis com pedidos de tempo em pequenos grupos. Os principais ma-

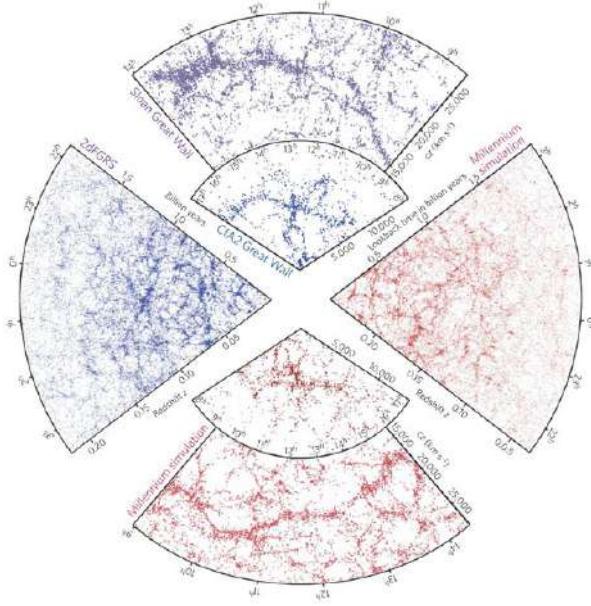


Figura 11: Comparação entre a distribuição de galáxias observada por mapeamentos de galáxias espectroscópicos e recortes da distribuição de matéria na simulação *Millennium* reproduzindo os efeitos de seleção dos mapeamentos. Em azul e roxo, vemos a estrutura em grande escala medida pelo 2dFGRS e pelo SDSS [79]. Em vermelho, vemos os dados simulados correspondentes. Fica evidente que a física modelada pela simulação é acurada o suficiente para reproduzir qualitativamente os tipos de estrutura observadas no universo.

peamentos de galáxias espectroscópicos desta era são os sucessores do mapeamento SDSS original. Do SDSS-II ao SDSS-V, as observações foram repartidas entre colaborações internas ao SDSS — tais como o Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) [80] e o Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA) [81]—cada uma com diferentes objetivos cosmológicos e astrofísicos. Já no lado fotométrico, os dois grandes mapeamentos desta era são o Dark Energy Survey (DES) [82] e o Kilo Degree Survey (KiDS) [83], ambos combinando medidas da correlação de galáxias e de cisalhamento cósmico para vincular modelos cosmológicos e propriedades da aceleração cósmica, com potencial para descoberta de novas propriedades da energia escura ou modificações da gravitação.

Nesta e na próxima década, mapeamentos de galáxias terrestres e espaciais na faixa do óptico e do infravermelho darão o próximo salto científico e tecnológico. Os satélites Euclid [84] e Nancy Grace Roman Space Telescope [85], o novo mapeamento em banda larga Legacy Survey of Space

and Time (LSST), realizado no Vera Rubin Observatory [86] e o Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) [87], dentre outros projetos, obterão imagens e espectros de objetos de brilho extremamente fraco, cobrindo a maior parte do céu observável. Cada um destes projetos possui características próprias que permitirão avançar além dos limites observacionais atuais, abrindo novas janelas na cosmologia e na astrofísica extragaláctica. Juntos, eles simbolizam uma era de ouro para os mapeamentos de galáxias, onde o emprego de tecnologias avançadas em novos telescópios terrestres e espaciais está remodelando nosso entendimento do universo e das galáxias em escalas cósmicas.

4.2 Cosmologia com mapeamentos de galáxias modernos

No início da década de 1990, os mapeamentos de galáxias tinham como um de seus objetivos primordiais medir as propriedades globais do universo. A densidade total de matéria e a curvatura do fundo cosmológico afetam a função de correlação de galáxias no universo recente, e a medida desta última permite inferir o valor destes parâmetros. Notadamente, o APM Galaxy Survey [37, 90] obteve medidas precisas digitalizando as placas fotográficas de um mapeamento de galáxias realizado com o UK Schmidt Telescope no Siding Spring Observatory, Australia. O APM obteve evidências fortes de que o universo não era unicamente constituído por matéria, seja ela escura ou bariônica. Graças a esta e outras observações, várias composições alternativas para o universo foram propostas e debatidas. Cada uma possuía incompatibilidades com dados observacionais, e a questão continuou em aberto durante grande parte da década de 90. A medida da aceleração cósmica com supernovas de tipo Ia [91, 92] e sua combinação com a medida das anisotropias da radiação cósmica de fundo [93] deixou claro que a densidade de matéria total corresponde a aproximadamente 30% da composição do universo e que este não apresenta curvatura, o que implica que 70% de seu conteúdo é desconhecido. Esta componente pode ser tratada como um fluido exótico, batizado de energia escura, ou como uma descrição efetiva de alguma modificação da teoria da gravidade. Independente da resposta, este se tor-

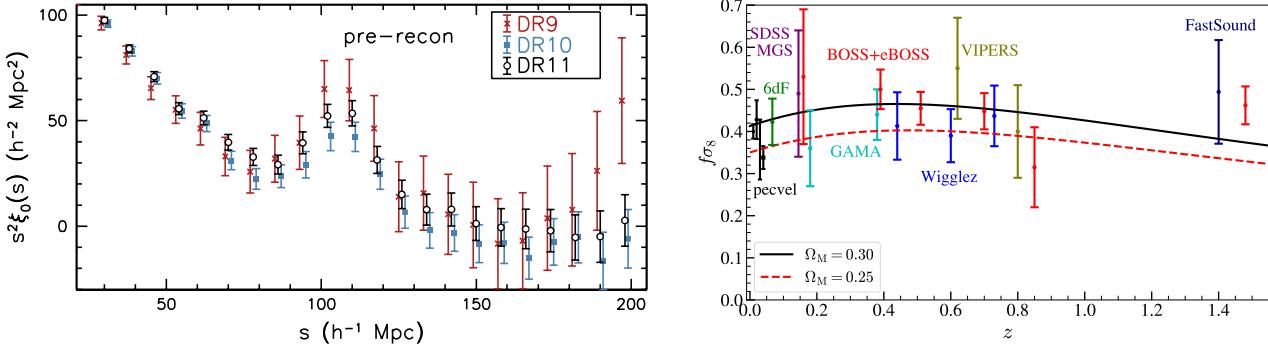


Figura 12: Esquerda: Medida da função de correlação de galáxias pelo mapeamento de galáxias BOSS [88]. Os diferentes conjuntos de pontos representam diferentes etapas de coletas de dados. O pico localizado próximo à escala de $110 h^{-1} \text{Mpc}$ é um resquício das oscilações acústicas de bárions primordiais, fornecendo uma régua-padrão. Direita: Compilação de medidas da taxa de crescimento de estruturas com diferentes mapeamentos [89]. A linha preta e vermelha indicam previsões feitas pelo modelo ΛCDM com diferentes valores de densidade de matéria. Uma modificação da intensidade da interação gravitacional também afetaria esta função.

nou o modelo cosmológico padrão, batizado de modelo ΛCDM .

Desde o início dos anos 2000, métodos de medida cosmológica com mapeamentos de galáxias evoluíram radicalmente, respondendo em parte ao grande poder vinculante das novas observações da radiação cósmica de fundo. Medidas cosmológicas com galáxias utilizavam, até este ponto, a forma geral da função de correlação de galáxias para vincular a densidade de matéria total no universo [90].⁶ Porém, uma nova maneira de realizar medidas cosmológicas de alta precisão com mapeamentos de galáxias foi proposta no início dos anos 2000 [97, 98]: a evolução do universo tem impacto direto sobre a variação do tamanho de objetos astronômicos com o *redshift*. Identificando uma família de objetos—ou observáveis, em geral—cujo tamanho intrínseco conseguimos inferir, podemos reconstruir a dinâmica cósmica. Chamamos este tipo de observável de régua-padrão. Os trabalhos acima identificaram uma régua-padrão presente na distribuição de galáxias, batizada de oscilações acústicas de bárions.

O que são oscilações acústicas de bárions? Quando o universo ainda é jovem e muito quente, matéria ordinária—principalmente, hidrogênio—e fôtons interagem fortemente, formando um

⁶Em muitos casos, o observável principal era o espectro de potência da matéria, uma transformada de Fourier da correlação espacial cuja descrição matemática vai além do escopo deste artigo. O leitor interessado pode consultar livros-texto da área de cosmologia [95, 96]

plasma. A física deste plasma primordial determina que há uma competição entre, de um lado, o efeito de atração gravitacional gerado pela grande quantidade de matéria escura e, de outro, a pressão de radiação do plasma, que resiste à compressão. Estas forças opostas geram flutuações de densidade com um tamanho característico dependendo da densidade relativa de matéria. Este tamanho pode ser observado ao longo das eras cósmicas e relacionado ao tamanho físico original, fornecendo assim uma régua-padrão. As oscilações acústicas de bárions no universo primordial são medidas de maneira extremamente precisa no espectro da radiação cósmica de fundo. De forma complementar, as mesmas oscilações deixam uma assinatura na distribuição de galáxias no céu, pois estas se formam preferencialmente em locais com uma leve sobre-densidade de matéria, induzida pela escala das oscilações acústicas. Esta assinatura se apresenta como um pequeno pico na função de correlação, como pode ser visto no painel esquerdo da Figura 12 [88]. A medida desta escala nos mapeamentos de galáxias se tornou uma das formas mais potentes de vincular as propriedades do universo.

A técnica descrita acima envolve o uso da estrutura em grande escala do universo como uma régua-padrão para medir suas propriedades globais em diferentes épocas. Entretanto, informação sobre a taxa de crescimento destas estruturas também pode ser obtida por meios indiretos. Isto permite investigar aspectos cruciais de modelos de gravitação modificada; caso haja uma

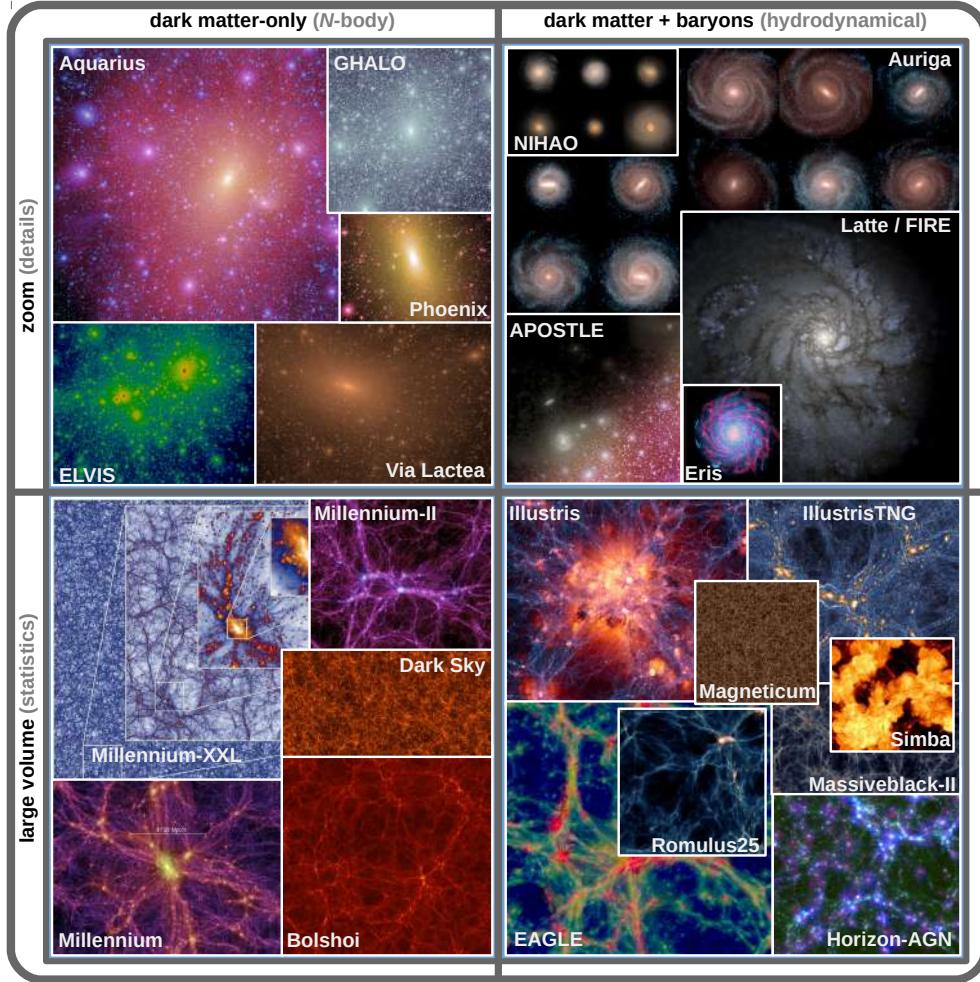


Figura 13: Recortes de simulações recentes da estrutura em grande escala e formação de galáxias. No eixo vertical, as simulações estão divididas entre simulações de grande escala, que fornecem amostras estatísticas de galáxias, e simulações de zoom, que possuem maior resolução numérica e podem sondar escalas menores com mais detalhes. No eixo horizontal, as simulações estão divididas em simulações apenas de matéria escura e matéria escura mais bárions [94].

possível variação da intensidade da interação gravitacional, a medida da taxa de crescimento de estruturas em diferentes épocas permite identificar este efeito, como mostrado no painel direito da Figura 12 [89]. O principal método para realizar esta medida é chamado de distorções no espaço de *redshift* [99]. Para entender como o método funciona, é preciso investigar com mais detalhes o efeito do crescimento de estruturas no *redshift* das galáxias. O efeito Doppler causado pela expansão do universo faz com que todas as galáxias tenham seu espectro luminoso deslocado para comprimentos de onda mais avermelhados, um efeito proporcional à distância. Velocidades peculiares se devem aos movimentos individuais de cada galáxia conforme são atraídas gravitacionalmente para regiões de alta densidade de

matéria. Estas regiões formam o que chamamos de poços de potencial gravitacional. Velocidades peculiares causam um efeito Doppler adicional no espectro de cada galáxia. Contrariamente ao *redshift* cosmológico, este efeito não é homogêneo e isotrópico; ele está correlacionado com a distribuição de matéria em grandes escalas e depende da direção na qual uma galáxia está se movendo, relativo a nossa linha de visada. A relação entre as velocidades peculiares e a densidade de matéria é mediada pela intensidade da interação gravitacional e, assim, podemos obter indiretamente informações sobre a força gravitacional em regimes muito além da nossa capacidade de realizar medidas diretas.

Os métodos de medida descritos nesta seção são os principais métodos empregados para me-

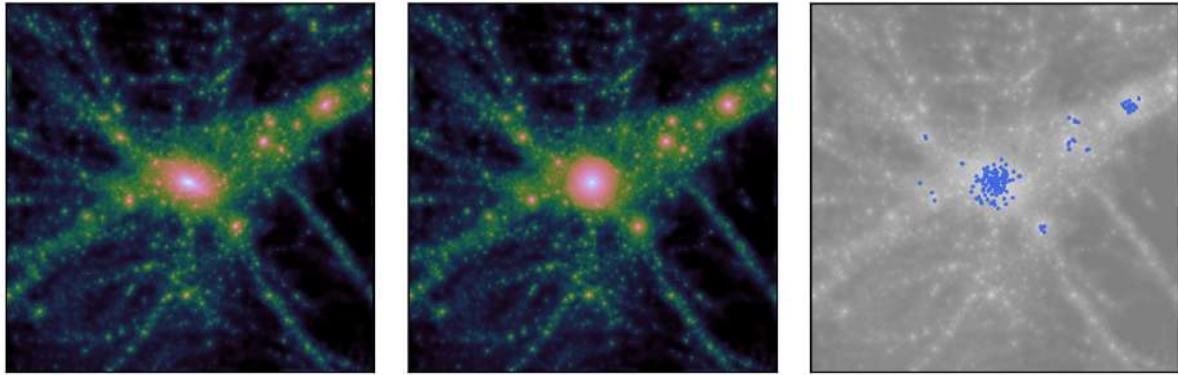


Figura 14: Visualização esquemática do procedimento proposto pelo modelo de halos [100]. Esquerda: recorte de uma simulação de n-corpos sem o efeito de física bariônica. A elipse central é um halo massivo de matéria escura. Centro: halos de matéria escura que o modelo de halos usaria neste caso. É importante notar que os halos do modelo de halos são esféricos, contrariamente aos halos simulados inicialmente. Direita: Um modelo de conexão galáxia-halo permite popular os halos do modelo. Cada ponto azul representa uma galáxia.

didas cosmológicas em mapeamentos de galáxias espectroscópicos. No caso de mapeamentos de galáxias fotométricos, o lenteamento gravitacional fraco é um importante método complementar que deriva seu poder vinculante da capacidade de sondar diretamente as perturbações de matéria totais.

4.3 Halos de matéria escura e a conexão galáxia-halo

Nos últimos 30 anos, simulações cosmológicas se tornaram cada vez mais centrais para interpretar e modelar os mapeamentos de galáxias. Um desenvolvimento crucial dessa era foi a formulação e validação do perfil Navarro-Frenk-White (NFW), um modelo que descreve a densidade de matéria em halos de matéria escura [101]. O modelo NFW propôs que a densidade dos halos segue um perfil universal, com apenas dois parâmetros ajustáveis. A simplicidade do perfil NFW fez dele uma ferramenta fundamental para o estudo da distribuição de matéria escura em aglomerados de galáxias e seu papel na formação e evolução das galáxias. As simulações desta era também continuaram a contribuir para a compreensão do impacto de modelos cosmológicos na morfologia e topologia da estrutura filamentar do universo [102].

Desde o início dos anos 2000, o aumento exponencial de poder computacional e sofisticação algorítmica permitiram gerar simulações de ma-

téria escura em volumes cósmicos e resoluções sem precedentes. Um marco dessa era foi a simulação Millennium [103], fornecendo uma descrição detalhada da distribuição de matéria escura e da complexa arquitetura da teia cósmica. Adicionalmente, um avanço significativo na evolução das simulações cosmológicas foi a incorporação do que chamamos de física bariônica, permitindo uma modelagem abrangente dos efeitos da dinâmica dos gases, formação estelar e mecanismos de retroalimentação de estrelas e buracos negros supermassivos, embora em volumes bem menores do que as simulações de matéria escura (e.g. [104]). Atualmente, as simulações cosmológicas são ferramentas cruciais para interpretar uma ampla gama de dados astronômicos, conciliando modelos teóricos com observações empíricas. A Figura 13 mostra imagens de mais de uma dezena de simulações realizadas nos últimos 20 anos, classificando-as em função das escalas que são capazes de modelar e se incluem ou não matéria bariônica.

Embora as simulações forneçam uma descrição qualitativa muito refinada da estrutura em grande escala do universo, colocar esta descrição em termos quantitativos e compará-la com dados observacionais é um problema complexo e muitas vezes intratável. Uma maneira alternativa de atacar este problema é o modelo de halo, proposto no início do milênio [105–107]. O conceito de halo de matéria escura já havia sido formulado desde a década de 70 para interpretar as observações

de aglomerados de galáxias, explicar o processo de formação de galáxias em aglomerados [108] e descrever as curvas de rotação de galáxias espirais. O modelo de halos propõe que uma descrição efetiva da estrutura em grande escala exclusivamente em termos de halos de matéria escura é uma excelente aproximação. Conhecendo as propriedades e a distribuição espacial destes halos, podemos estimar as propriedades estatísticas da distribuição de matéria. O passo seguinte necessário para modelar a função de correlação de galáxias é descrever como as galáxias ocupam halos de diferentes massas. O problema então se divide em dois: (i) como as galáxias se organizam dentro de um dado halo e; (ii) como os halos se distribuem no espaço. Essa informação pode ser motivada por ou extraída de simulações numéricas, levando a um modelo analítico flexível das propriedades estatísticas da teia cósmica. A Figura 14 ilustra o princípio do modelo de halos, onde as partículas de matéria numa simulação são agrupadas e associadas a halos, cuja massa é definida como proporcional à densidade de partículas presentes [100].

Confrontando esse modelo com observações, a abordagem do modelo de halos pode fornecer restrições sobre a cosmologia subjacente do Universo, além de oferecer uma visão única da conexão galáxia-halo e avançar nosso entendimento da formação e evolução de galáxias. Graças ao grande volume de simulações cosmológicas e às ferramentas da cosmologia e gravitação teóricas, temos bons modelos de como os halos se distribuem. Infelizmente, não temos a mesma compreensão sobre como as galáxias se organizam dentro de um halo. Este problema atende pelo nome de conexão galáxia-halo, e elucidar essa conexão é um passo para responder a várias das maiores questões em astrofísica e cosmologia hoje [109]. De um ponto de vista astrofísico, podemos buscar entender a física da formação de galáxias: Como o gás esfria nas galáxias, como as estrelas se formam e o que determina os processos de retroalimentação dominantes? Como podemos inferir melhor a física a partir das observações disponíveis, incluindo a distribuição espacial das galáxias em função de suas propriedades?

Grande parte dos desenvolvimentos teóricos na área de formação e evolução de galáxias se deram em sincronia com os grandes avanços ob-

servacionais proporcionados pelos novos mapeamentos de galáxias. Principalmente a partir do advento do 2dFGRS e do SDSS, já citados num contexto cosmológico, foi possível obter amostras de galáxias ordens de magnitude maiores do que anteriormente, o que permitiu muito mais precisão no estudo de correlações estatísticas entre suas propriedades físicas, como luminosidade e cor ou massa estelar e taxa de formação de estrelas (SFR). Além destes grandes mapeamentos, uma gama de projetos ao longo das últimas décadas forneceu observações em diversos comprimentos de onda, resolução e profundidade; um exemplo é o mapeamento Galaxy And Mass Assembly (GAMA), cujos objetivos principais envolveram verificar observationalmente algumas das previsões dos modelos de formação e evolução de galáxias e seus respectivos halos, conforme discutido ao longo deste artigo [110].

É impossível fazer justiça à imensa atividade na área de formação e evolução de galáxias nas últimas décadas e sua relação com mapeamentos de galáxias. Artigos de revisão sobre as observações [111], sobre modelos físicos de formação e evolução de galáxias [112, 113], sobre modelos de halo [100] e da conexão halo-galáxia [109] e sobre simulações cosmológicas [94, 114] fornecem ao leitor interessado múltiplos pontos de entrada a esta vasta literatura.

5 Conclusões

Neste artigo, descrevemos a evolução histórica dos mapeamentos de galáxias e sua contribuição fundamental para o desenvolvimento da astrofísica extragaláctica e da cosmologia. Desde as primeiras observações sistemáticas de objetos extragaláticos—à época, conhecidos como nebulosas—os mapeamentos de galáxias realizam descobertas que suscitam perguntas profundas sobre a natureza do universo e seus constituintes, na mesma proporção em que buscam responder às perguntas trazidas pelas observações já existentes. Para avançar neste processo, construímos telescópios e instrumentos cada vez mais potentes que simultaneamente criam e se alimentam dos desenvolvimentos tecnológicos contemporâneos. Consequentemente, ao reconstruir uma história do progresso dos mapeamentos de galáxias

e suas tecnologias, estamos simultaneamente entendendo o processo pelo qual construímos nosso conhecimento sobre o universo e sobre a formação e evolução de galáxias.

Num primeiro momento, os mapeamentos de galáxias desempenharam um papel crucial para estabelecer a natureza extragaláctica das nebulosas, alterando radicalmente nossa compreensão sobre a Via Láctea e seu lugar no universo. Com o surgimento da ideia de que existe um número incontável de galáxias no universo, surge imediatamente a ideia de classificar estes objetos para melhor entender suas propriedades. Em paralelo, os mapeamentos de galáxias também fornecem comprovação observacional dos modelos cosmológicos formulados a partir da relatividade geral, tanto pela medida da expansão do universo quanto pelas primeiras observações de uma homogeneidade e isotropia estatísticas. Hubble foi uma figura de proa em ambos os eixos, estabelecendo as primeiras bases para nosso entendimento atual do universo e das galáxias.

Após a Segunda Guerra Mundial e até o fim da década de 1980, o ritmo de descobertas se acelera, em grande parte graças a avanços tecnológicos gestados no esforço de guerra, como o desenvolvimento de computadores, instrumentos digitais e telescópios observando em diferentes comprimentos de onda e em escalas cada vez maiores. O resultado é um progresso significativo em várias direções, incluindo: a aplicação de técnicas estatísticas para o estudo da estrutura em grande escala na distribuição de galáxias; o entendimento progressivo de processos físicos da formação e evolução de galáxias e o desenvolvimento de simulações numéricas detalhadas, permitindo investigar tanto o impacto de colisões de galáxias na variedade morfológica observada quanto às propriedades da estrutura em grande escala. Uma nova descoberta que permeia todos estes temas é a existência de matéria escura, tanto em halos englobando galáxias quanto nos nós e filamentos da estrutura em grande escala, moldando sua topologia. As observações do período, em particular o advento do CfA Redshift Survey, confirmam o paradigma da matéria escura fria, que se torna um dos pilares do modelo cosmológico padrão.

A construção de grandes telescópios equipados com câmeras digitais e espectrógrafos multi-objetos e a realização de grandes mapeamentos

de galáxias envolvendo de dezenas a centenas de cientistas gera uma nova revolução observacional, acompanhada pelo desenvolvimento de grandes simulações cosmológicas, agora também modelando em alguns casos a física do gás, estrelas e buracos negros. Os mapeamentos de galáxias espectroscópicos observam um número de galáxias de duas a três ordens de grandeza maior do que levantamentos anteriores, enquanto que simultaneamente se desenvolve a técnica do lenteamento gravitacional pela estrutura em grande escala, permitindo medir diretamente a distribuição de matéria escura no universo. Do ponto de vista da cosmologia, estes avanços permitem vincular de maneira cada vez mais rigorosa as propriedades básicas do universo e buscar possíveis alterações da gravidade potencialmente ligadas à energia escura ou a uma teoria alternativa de gravitação. Já na área de formação e evolução de galáxias, o modelo de halos e a conexão galáxia-halo ganham força como uma descrição fenomenológica que pode ser comparada com observações das propriedades de galáxias e calibrada com simulações cosmológicas, abrindo as portas para uma compreensão das propriedades estatísticas de grandes populações de galáxias.

Na próxima década, uma nova geração de mapeamentos de galáxias tem o potencial de revolucionar mais uma vez a nossa compreensão da cosmologia e da astrofísica extragaláctica. Reafirmando o tema central deste artigo, a relação simbiótica entre inovação tecnológica e descoberta científica se mantém, manifestando-se no papel crítico que os mapeamentos de galáxias exercem no avanço da astrofísica e cosmologia. Até hoje, o universo não cessa de nos surpreender, e a história dos mapeamentos de galáxias sugere que novas descobertas continuarão a surgir.

Agradecimentos

Agradeço o apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), processo nº E-26/2010.203/2019; ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) pela hospitalidade continuada; ao LIneA e ao BPG-Lsst pelo suporte técnico e científico nas atividades ligadas ao Rubin Observatory Legacy Survey of Space and

Time e ao IF-UFRJ pelo suporte institucional. Agradeço a Felipe Tovar Falciano pelo convite e pela enorme paciência com os múltiplos atrasos, e à Sarah, Arthur, Juca e Léa pelo apoio e paciência durante a escrita.

Sobre o autor

Bruno Azevedo Lemos Moraes (moraes@if.ufrj.br) é professor adjunto e pesquisador do Instituto de Física da UFRJ. É especialista em cosmologia observational, área de pesquisa na interface entre a cosmologia e a astrofísica extragaláctica. Seu principal foco de pesquisa é na análise de mapeamentos de galáxias fotométricos e compreensão de contaminantes astrotípicos e observational, buscando vincular parâmetros cosmológicos e a massa de neutrinos. É membro do Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time por meio de seu Brazilian Participation Group (BPG-LSST).

Referências

- [1] T. E. O. Rosse, *Observations on the Nebulae*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I **140**, 499 (1850).
- [2] C. Messier, *Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Étoiles* (Imprimerie royale, Paris, 1781).
- [3] J. F. W. Herschel, *Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London **154**, 1 (1864).
- [4] J. L. E. Dreyer, *A New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars, being the Catalogue of the late Sir John F. W. Herschel, Bart., revised, corrected, and enlarged*, Memoirs of the Royal Astronomical Society **49**, 1 (1888).
- [5] J. L. E. Dreyer, *Index Catalogue of Nebulae found in the years 1888 to 1894, with Notes and Corrections to the New General Catalogue*, Memoirs of the Royal Astronomical Society **51**, 185 (1895).
- [6] J. L. E. Dreyer, *Second Index Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars; Containing Objects Found in the Years 1895 to 1907, with Notes and Corrections to the New General Catalogue and to the Index Catalogue for 1888–94*, Memoirs of the Royal Astronomical Society **59**, 105 (1908).
- [7] J. Fraunhofer, *Bestimmung des Brechungs- und des Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommenung achromatischer Fernröhre*, Annalen der Physik **56**(7), 264 (1817).
- [8] G. Kirchhoff, *Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spectren der Chemischen Elemente (Part 1)*, Abhandlungen der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **1**, 63 (1861).
- [9] G. Kirchhoff, *Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spectren der Chemischen Elemente (Part 1 continued)*, Abhandlungen der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **1**, 227 (1862).
- [10] G. Kirchhoff, *Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spectren der Chemischen Elemente (Part 2)*, Abhandlungen der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **1**, 225 (1863).
- [11] C. Doppler, *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*, Abhandlungen der Königlichen Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften **2**, 465 (1842).
- [12] M. S. Longair, *The Cosmic Century: A History of Astrophysics and Cosmology* (Cambridge University Press, 2006).
- [13] H. S. Leavitt e E. C. Pickering, *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*, Harvard College Observatory Circular **173**, 1 (1912).

- [14] E. P. Hubble, *Cepheids in Spiral Nebulae*, in *Publications of the American Astronomical Society* (1925), vol. 5 de *Publications of the American Astronomical Society*, 261–264.
- [15] E. P. Hubble, *Extragalactic nebulae*, *The Astrophysical Journal* **64**, 321 (1926).
- [16] E. P. Hubble, *Realm of the Nebulae* (Yale University Press, New Haven, 1936).
- [17] V. M. Slipher, *A Spectrographic Investigation of Spiral Nebulae*, Proceedings of the American Philosophical Society **56**, 403 (1917).
- [18] E. Hubble, *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, Proceedings of the National Academy of Science **15**(3), 168 (1929).
- [19] E. Hubble e M. L. Humason, *The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae*, *The Astrophysical Journal* **74**, 43 (1931).
- [20] A. Sandage, *The Hubble Atlas of Galaxies*, Carnegie Institution of Washington Publication 618 (Carnegie Institution of Washington, Washington, 1961).
- [21] A. Toomre e J. Toomre, *Galactic Bridges and Tails*, *The Astrophysical Journal* **178**, 623 (1972).
- [22] K. G. Jansky, *Radio Waves from Outside the Solar System*, *Nature* **132**(3323), 66 (1933).
- [23] G. Reber, *Notes: Cosmic Static*, *The Astrophysical Journal* **91**, 621 (1940).
- [24] F. Hoyle, *A New Model for the Expanding Universe*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **108**, 372 (1948).
- [25] J. Shakeshaft et al., *A survey of radio sources between declinations -38° and $+83^\circ$* , *Memoirs of the Royal Astronomical Society* **67**, 106 (1955).
- [26] A. A. Penzias e R. W. Wilson, *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*, *The Astrophysical Journal* **142**, 419 (1965).
- [27] I. Heywood, M. J. Jarvis e J. J. Condon, *Sample variance, source clustering and their influence on the counts of faint radio sources*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **432**(4), 2625 (2013). [ArXiv:1302.2010](https://arxiv.org/abs/1302.2010).
- [28] D. Saadeh et al., *How Isotropic is the Universe?*, *Physical Review Letters* **117**(13), 131302 (2016). [ArXiv:1605.07178](https://arxiv.org/abs/1605.07178).
- [29] C. D. Shane e C. A. Wirtanen, *The distribution of extragalactic nebulae*, *The Astronomical Journal* **59**, 285 (1954).
- [30] J. Neyman e E. L. Scott, *A Theory of the Spatial Distribution of Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **116**, 144 (1952).
- [31] J. Neyman, E. L. Scott e C. D. Shane, *On the Spatial Distribution of Galaxies: a Specific Model*, *The Astrophysical Journal* **117**, 92 (1953).
- [32] J. Neyman, E. L. Scott e C. D. Shane, *The Index of Clumpiness of the Distribution of Images of Galaxies*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **1**, 269 (1954).
- [33] D. N. Limber, *The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field*, *The Astrophysical Journal* **117**, 134 (1953).
- [34] D. N. Limber, *The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field II*, *The Astrophysical Journal* **119**, 655 (1954).
- [35] V. C. Rubin, *Fluctuations in the Space Distribution of the Galaxies*, *Proceedings of the National Academy of Science* **40**(7), 541 (1954).
- [36] V. J. Martínez e E. Saar, *Statistics of the Galaxy Distribution* (Chapman and Hall/CRC, 2002).
- [37] S. J. Maddox et al., *Galaxy correlations on large scales*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **242**, 43P (1990).

- [38] M. Davis et al., *A survey of galaxy redshifts. II. The large scale space distribution*, *The Astrophysical Journal* **253**, 423 (1982).
- [39] J. Huchra et al., *A survey of galaxy redshifts. IV - The data*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **52**, 89 (1983).
- [40] P. J. E. Peebles, *Cosmology's Century: An Inside History of our Modern Understanding of the Universe* (Princeton University Press, 2020).
- [41] P. J. E. Peebles, *The large-scale structure of the universe* (Princeton University Press, 1980).
- [42] M. Joeveer e J. Einasto, *Has the Universe the Cell Structure?*, in *Large Scale Structures in the Universe*, editado por M. S. Longair e J. Einasto (1978), vol. 79, 241.
- [43] F. Zwicky, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, *Helvetica Physica Acta* **6**, 110 (1933).
- [44] G. O. Abell, *The Distribution of Rich Clusters of Galaxies*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **3**, 211 (1958).
- [45] T. S. van Albada et al., *Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198*, *The Astrophysical Journal* **295**, 305 (1985).
- [46] C. S. Frenk, *Galaxy Clustering and the Dark-Matter Problem*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* **320**(1556), 517 (1986).
- [47] H. Mo, F. C. van den Bosch e S. White, *Galaxy Formation and Evolution* (Cambridge University Press, 2010).
- [48] V. C. Rubin e J. Ford, W. Kent, *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, *The Astrophysical Journal* **159**, 379 (1970).
- [49] D. H. Rogstad e G. S. Shostak, *Gross Properties of Five Scd Galaxies as Determined from 21-Centimeter Observations*, *The Astrophysical Journal* **176**, 315 (1972).
- [50] J. Einasto, A. Kaasik e E. Saar, *Dynamic evidence on massive coronas of galaxies*, *Nature* **250**(5464), 309 (1974).
- [51] J. P. Ostriker, P. J. E. Peebles e A. Yahil, *The Size and Mass of Galaxies, and the Mass of the Universe*, *The Astrophysical Journal* **193**, L1 (1974).
- [52] V. C. Rubin, J. Ford, W. K. e N. Thonnard, *Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 ($R=4\text{kpc}$) to UGC 2885 ($R=122\text{kpc}$)*, *The Astrophysical Journal* **238**, 471 (1980).
- [53] G. Efstathiou, *The clustering of galaxies and its dependence upon OMEGA*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **187**, 117 (1979).
- [54] V. A. Lyubimov et al., *An estimate of the ν_e mass from the β -spectrum of tritium in the valine molecule*, *Physics Letters B* **94**(2), 266 (1980).
- [55] G. R. Blumenthal et al., *Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter*, *Nature* **311**, 517 (1984).
- [56] S. D. M. White, C. S. Frenk e M. Davis, *Clustering in a neutrino-dominated universe*, *The Astrophysical Journal* **274**, L1 (1983).
- [57] M. Davis et al., *The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter*, *The Astrophysical Journal* **292**, 371 (1985).
- [58] G. Bertone e D. Hooper, *History of dark matter*, *Reviews of Modern Physics* **90**(4), 045002 (2018). [ArXiv:1605.04909](https://arxiv.org/abs/1605.04909).
- [59] C. S. Frenk e S. D. M. White, *Dark matter and cosmic structure*, *Annalen der Physik* **524**(9-10), 507 (2012). [ArXiv:1210.0544](https://arxiv.org/abs/1210.0544).
- [60] J. E. Gunn e I. Gott, J. Richard, *On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution*, *The Astrophysical Journal* **176**, 1 (1972).

- [61] J. E. Gunn, *The Friedmann Models and Optical Observations in Cosmology*, in *Saas-Fee Advanced Course 8: Observational Cosmology Advanced Course*, editado por A. Maeder, L. Martinet e G. Tammann (1978).
- [62] A. Dressler, *Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies*, *The Astrophysical Journal* **236**, 351 (1980).
- [63] P. Schechter, *An analytic expression for the luminosity function for galaxies*, *The Astrophysical Journal* **203**, 297 (1976).
- [64] S. M. Faber e R. E. Jackson, *Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies*, *The Astrophysical Journal* **204**, 668 (1976).
- [65] S. Djorgovski e M. Davis, *Fundamental Properties of Elliptical Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **313**, 59 (1987).
- [66] A. Dressler et al., *Spectroscopy and Photometry of Elliptical Galaxies. I. New Distance Estimator*, *The Astrophysical Journal* **313**, 42 (1987).
- [67] R. B. Tully e J. R. Fisher, *A new method of determining distances to galaxies*, *Astronomy and Astrophysics* **54**, 661 (1977).
- [68] D. Lynden-Bell, *Statistical mechanics of violent relaxation in stellar systems*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **136**, 101 (1967).
- [69] J. P. Ostriker e S. D. Tremaine, *Another evolutionary correction to the luminosity of giant galaxies*, *The Astrophysical Journal* **202**, L113 (1975).
- [70] A. Sandage e E. Hardy, *The Redshift-Distance Relation. VII. Absolute Magnitudes on the First Three Ranked Cluster Galaxies as Functions of Cluster Richness and Bautz-Morgan Cluster Type: the Effect of q_0* , *The Astrophysical Journal* **183**, 743 (1973).
- [71] M. A. Hausman e J. P. Ostriker, *Galactic cannibalism. III. The morphological evolution of galaxies and clusters*, *The Astrophysical Journal* **224**, 320 (1978).
- [72] M. Bartelmann e P. Schneider, *Weak gravitational lensing*, *Physics Reports* **340**(4-5), 291 (2001). [ArXiv:astro-ph/9912508](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9912508).
- [73] L. Van Waerbeke et al., *Detection of correlated galaxy ellipticities from CFHT data: first evidence for gravitational lensing by large-scale structures*, *Astronomy and Astrophysics* **358**, 30 (2000). [ArXiv:astro-ph/0002500](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0002500).
- [74] N. Kaiser, G. Wilson e G. A. Luppino, *Large-Scale Cosmic Shear Measurements*, arXiv (2000). [ArXiv:astro-ph/0003338](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0003338).
- [75] D. J. Bacon, A. R. Refregier e R. S. Ellis, *Detection of weak gravitational lensing by large-scale structure*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **318**, 625 (2000). [ArXiv:astro-ph/0003008](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0003008).
- [76] D. M. Wittman et al., *Detection of weak gravitational lensing distortions of distant galaxies by cosmic dark matter at large scales*, *Nature* **405**, 143 (2000). [ArXiv:astro-ph/0003014](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0003014).
- [77] M. Colless et al., *The 2dF Galaxy Redshift Survey: Final Data Release*, arXiv e-prints astro-ph/0306581 (2003). [ArXiv:astro-ph/0306581](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0306581).
- [78] D. G. York et al., *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*, *The Astronomical Journal* **120**(3), 1579 (2000). [ArXiv:astro-ph/0006396](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006396).
- [79] V. Springel, C. S. Frenk e S. D. M. White, *The large-scale structure of the Universe*, *Nature* **440**(7088), 1137 (2006). [ArXiv:astro-ph/0604561](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0604561).
- [80] K. S. Dawson et al., *The Baryon Oscillation Spectroscopic Survey of SDSS-III*, *The Astronomical Journal* **145**(1), 10 (2013). [ArXiv:1208.0022](https://arxiv.org/abs/1208.0022).

- [81] K. Bundy et al., *Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory*, *The Astrophysical Journal* **798**(1), 7 (2015). [ArXiv:1412.1482](#).
- [82] The Dark Energy Survey Collaboration, *The Dark Energy Survey*, [arXiv](#), [astro-ph/0510346](#) (2005).
- [83] J. T. de Jong et al., *The Kilo-Degree Survey*, *The Messenger* **154**, 44 (2013).
- [84] R. Laureijs et al., *Euclid Definition Study Report*, [arXiv](#), [1110.3193](#) (2011).
- [85] R. Akeson et al., *The Wide Field Infrared Survey Telescope: 100 Hubbles for the 2020s*, [arXiv](#), [1902.05569](#) (2019).
- [86] Ž. Ivezić et al., *LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products*, *The Astrophysical Journal* **873**(2), 111 (2019). [ArXiv:0805.2366](#).
- [87] DESI Collaboration, *The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design*, [arXiv](#), [1611.00036](#) (2016).
- [88] L. Anderson et al., *The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: baryon acoustic oscillations in the Data Releases 10 and 11 Galaxy samples*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **441**(1), 24 (2014). [ArXiv:1312.4877](#).
- [89] D. Huterer, *Growth of cosmic structure*, *Astronomy and Astrophysics Review* **31**(1), 2 (2023). [ArXiv:2212.05003](#).
- [90] G. Efstathiou, W. J. Sutherland e S. J. Maddox, *The cosmological constant and cold dark matter*, *Nature* **348**(6303), 705 (1990).
- [91] A. G. Riess et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, *The Astronomical Journal* **116**(3), 1009 (1998). [ArXiv:astro-ph/9805201](#).
- [92] S. Perlmutter et al., *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*, *The Astrophysical Journal* **517**(2), 565 (1999). [ArXiv:astro-ph/9812133](#).
- [93] D. N. Spergel et al., *First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **148**(1), 175 (2003). [ArXiv:astro-ph/0302209](#).
- [94] M. Vogelsberger et al., *Cosmological simulations of galaxy formation*, *Nature Reviews Physics* **2**(1), 42 (2020). [ArXiv:1909.07976](#).
- [95] S. Dodelson e F. Schmidt, *Modern Cosmology* (Academic Press, 2020).
- [96] D. Baumann, *Cosmology* (Cambridge University Press, 2022).
- [97] C. Blake e K. Glazebrook, *Probing Dark Energy Using Baryonic Oscillations in the Galaxy Power Spectrum as a Cosmological Ruler*, *The Astrophysical Journal* **594**(2), 665 (2003). [ArXiv:astro-ph/0301632](#).
- [98] D. J. Eisenstein et al., *Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **633**(2), 560 (2005). [ArXiv:astro-ph/0501171](#).
- [99] N. Kaiser, *Clustering in real space and in redshift space*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **227**, 1 (1987).
- [100] M. Asgari, A. J. Mead e C. Heymans, *The halo model for cosmology: a pedagogical review*, *The Open Journal of Astrophysics* **6**, 39 (2023). [ArXiv:2303.08752](#).
- [101] J. F. Navarro, C. S. Frenk e S. D. M. White, *The Structure of Cold Dark Matter Halos*, *The Astrophysical Journal* **462**, 563 (1996). [ArXiv:astro-ph/9508025](#).
- [102] G. Kauffmann et al., *Clustering of galaxies in a hierarchical universe - I. Methods and results at $z=0$* , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **303**(1), 188 (1999). [ArXiv:astro-ph/9805283](#).

- [103] V. Springel et al., *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*, *Nature* **435**(7042), 629 (2005). [ArXiv:astro-ph/0504097](#).
- [104] M. Vogelsberger et al., *Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **444**(2), 1518 (2014). [ArXiv:1405.2921](#).
- [105] U. Seljak, *Analytic model for galaxy and dark matter clustering*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **318**(1), 203 (2000). [ArXiv:astro-ph/0001493](#).
- [106] C.-P. Ma e J. N. Fry, *Deriving the Non-linear Cosmological Power Spectrum and Bispectrum from Analytic Dark Matter Halo Profiles and Mass Functions*, *The Astrophysical Journal* **543**(2), 503 (2000). [ArXiv:astro-ph/0003343](#).
- [107] J. A. Peacock e R. E. Smith, *Halo occupation numbers and galaxy bias*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **318**(4), 1144 (2000). [ArXiv:astro-ph/0005010](#).
- [108] S. D. M. White e M. J. Rees, *Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **183**, 341 (1978).
- [109] R. H. Wechsler e J. L. Tinker, *The Connection Between Galaxies and Their Dark Matter Halos*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **56**, 435 (2018). [ArXiv:1804.03097](#).
- [110] J. Liske et al., *Galaxy And Mass Assembly (GAMA): end of survey report and data release 2*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **452**(2), 2087 (2015). [ArXiv:1506.08222](#).
- [111] M. R. Blanton e J. Moustakas, *Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **47**(1), 159 (2009). [ArXiv:0908.3017](#).
- [112] T. Naab e J. P. Ostriker, *Theoretical Challenges in Galaxy Formation*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **55**(1), 59 (2017). [ArXiv:1612.06891](#).
- [113] R. S. Somerville e R. Davé, *Physical Models of Galaxy Formation in a Cosmological Framework*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **53**, 51 (2015). [ArXiv:1412.2712](#).
- [114] R. E. Angulo e O. Hahn, *Large-scale dark matter simulations*, *Living Reviews in Computational Astrophysics* **8**(1), 1 (2022). [ArXiv:2112.05165](#).

Halos de matéria escura em galáxias

Rubens E. G. Machado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo

Halos de matéria escura são indispensáveis para se compreender a dinâmica de galáxias. Neste artigo, apresentamos de maneira introdutória o conceito de curva de rotação, para explicar a necessidade de matéria escura em galáxias. Em seguida, examinamos em mais detalhes a distribuição espacial da matéria escura, isto é, seu perfil de densidade. Por fim, colocamos o halo de matéria escura no contexto das outras componentes (disco estelar, bojo e gás) para construir um modelo dinâmico composto.

Abstract

Dark matter halos are essential for understanding the dynamics of galaxies. In this paper, we present the concept of rotation curve in an introductory manner to explain the need for dark matter in galaxies. Subsequently, we delve into a more detailed examination of the spatial distribution of dark matter, namely, its density profile. Finally, we place the dark matter halo in the context of the other components (stellar disk, bulge, and gas) to construct a compound dynamical model.

Palavras-chave: astronomia, galáxias, matéria escura.

Keywords: astronomy, galaxies, dark matter.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43132](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43132)

1 Introdução

Ao se propor uma definição de galáxia, pareceria natural afirmar que galáxias são feitas de estrelas — centenas de bilhões de estrelas. No entanto, as estrelas (somadas ao gás) respondem por apenas cerca de 15% da massa total de uma galáxia típica; os outros 85% correspondem à matéria escura. A imagem que temos atualmente é que cada galáxia está imersa em um grande halo de matéria escura. É a gravidade desse halo que determina o movimento das estrelas como um todo. Hoje em dia, é essencialmente impossível compreender a estrutura de galáxias sem falar em matéria escura.

Ainda não sabemos de que substância a matéria escura é composta. Ela não pode ser observada diretamente, pois não emite luz em nenhum comprimento de onda. Além disso, também não absorve luz. Só conseguimos deduzir a presença da matéria escura indiretamente, pois ela tem massa. Tendo massa, ela exerce forças gravitacionais, que afetam o movimento das estrelas de maneiras bem específicas. E o movimento das estrelas, esse sim, pode ser observado, já que as

estrelas emitem luz.

Do ponto de vista histórico, costuma-se citar o trabalho de Fritz Zwicky [1] sobre o aglomerado de galáxias de Coma como sendo a primeira evidência para existência de matéria escura. No entanto, essa citação em ordem cronológica poderia fazer crer que o tópico de matéria escura estava ativamente presente na astronomia desde os anos 1930, o que não é bem o caso. Foi apenas ao longo da década de 1970 que a existência de matéria escura mostrou-se incontornável na astronomia. Isso deu-se graças à observação das curvas de rotação de galáxias espirais. Não faremos aqui uma revisão histórica das observações, mas na referência [2], de autoria de Albert Bosma, encontra-se um interessante e detalhado relato histórico do gradual entendimento que emergiu ao longo dos anos 1970. Outro problema em começar a contar a história da matéria escura desde Zwicky é que, naquela época, a suposta “massa faltante” poderia em princípio se referir a alguma massa não-luminosa (no sentido de não-estelar): talvez gás, poeira ou eventuais componentes difíceis de observar. Não estava clara ainda a natureza do pro-

blema. No nosso vocabulário atual, quando dizemos *matéria escura*, já estamos excluindo toda a eventual massa na forma de átomos.

O presente artigo pretende introduzir o conceito de matéria escura em galáxias para o leitor que ainda não tem familiaridade com o tema. Na seção 2, entenderemos como exatamente as curvas de rotação de galáxias espirais evidenciam a presença da matéria escura. O leitor poderá acompanhar aquela seção apenas partindo de conceitos físicos e matemáticos do ensino médio. Discutiremos as implicações da existência da matéria escura e seu status atual na astronomia.

Na seção 3, veremos em mais detalhe como a matéria escura se distribui em galáxias, isto é, estudaremos perfis de densidade. Aquela seção pode ser útil para alunos de graduação que estejam começando a estudar astronomia extragaláctica. A abordagem matemática não é demasiadamente avançada e é apresentada inicialmente de modo a convidar todos os leitores a acompanhar os argumentos.

Por fim, na seção 4, o halo de matéria escura será colocado no contexto das demais componentes estelares e gasosas da galáxia, para compor um modelo dinâmico. Essas duas últimas seções trazem equações que são bastante usadas na pesquisa em astronomia extragaláctica, mas que não são comumente encontradas em materiais didáticos voltados à graduação. Nesse sentido, essa compilação pode servir como um material de consulta para estudantes.

Já que nosso foco aqui são as galáxias em si, não abordaremos o tópico de matéria escura em aglomerados de galáxias. Tampouco será aprofundado o tema de matéria escura na cosmologia, embora a formação de galáxias se dê nesse contexto cosmológico. Além disso, nosso enfoque será nos conceitos e na modelagem teórica das estruturas envolvidas, e não tanto nos aspectos observacionais das curvas de rotação. O leitor interessado poderá encontrar outros detalhes na referência [3].

2 Curvas de rotação

Estrelas orbitam o centro da galáxia. Cada estrela está a uma certa distância do centro, e tem uma certa velocidade. Essa velocidade v em fun-

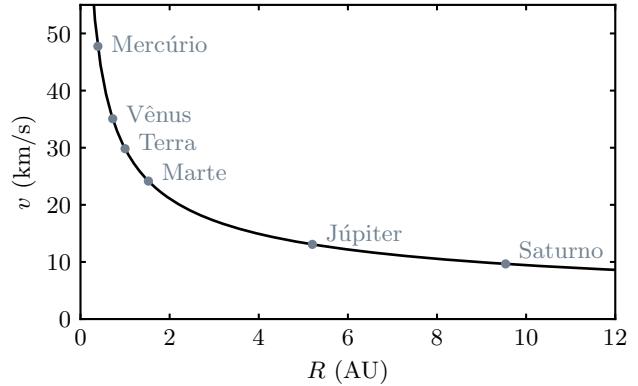


Figura 1: Velocidades orbitais de alguns dos planetas do sistema solar em função do raio orbital em Unidades Astronômicas.

ção da distância galactocêntrica R é o que chamamos de curva de rotação: $v(R)$. Trata-se de uma dinâmica governada pela força gravitacional. Antes de seguirmos para o estudo das curvas de rotação em galáxias, precisamos dar um passo atrás. Como sempre se faz na física, antes de estudar sistemas complicados, convém estudar o sistema mais simples possível. Do ponto de vista gravitacional, o sistema de interesse mais simples é um sistema de 2 corpos; por exemplo, a órbita de um planeta ao redor do Sol.

2.1 Órbitas planetárias

Por simplicidade, considere que o planeta está em órbita circular, de raio R . Qual a velocidade orbital nesse raio? Se o Sol tem massa M e o planeta tem massa m , a segunda lei de Newton escrita para o planeta é:

$$\frac{GMm}{R^2} = m \frac{v^2}{R}$$

A resultante de forças que age no planeta é a força gravitacional GMm/R^2 . A aceleração é a aceleração centrípeta $a_c = v^2/R$, pois trata-se de um movimento circular uniforme. Resulta que a velocidade é:

$$v(R) = \sqrt{\frac{GM}{R}}. \quad (1)$$

Essa é uma manifestação da terceira lei de Kepler. Para re-expressá-la numa forma mais usual, basta substituir $v = 2\pi R/P$. Assim obtém-se a proporcionalidade $P^2 \propto R^3$ entre o período orbital P e o raio. Por esse motivo, essa dependência

funcional $v(R)$ é chamada de uma curva de rotação kepleriana.

Agora compreendemos que a velocidade é inversamente proporcional a \sqrt{R} . Ou seja, se fizermos um gráfico para os planetas do sistema solar, teremos uma curva como a da Fig. 1. Mercúrio orbita o Sol com uma alta velocidade; Saturno orbita o Sol com uma baixa velocidade. Tendo como base esse entendimento do sistema solar, podemos voltar ao nosso estudo de galáxias.

2.2 Curvas de rotação de galáxias espirais

Galáxias e sistemas planetários têm em comum a característica de que existe rotação ao redor do centro: planetas orbitam o Sol; estrelas orbitam o centro da galáxia. Essa analogia não nos levará muito longe, mas é com ela que começamos. Vamos concluir em breve que a curva de rotação de um disco estelar deveria ser semelhante à curva de rotação do sistema solar — ao menos para grandes raios. No entanto, vejamos primeiro quais são as ressalvas quanto à região mais interna do disco.

Em que aspectos uma galáxia difere do sistema solar? Importantemente, a distribuição de massa da galáxia é bastante diferente. Afinal, no sistema solar a massa total está praticamente concentrada em um único ponto, que é o Sol. A massa de qualquer dado planeta (ou de vários planetas) é minúscula comparada à massa do Sol. Nossa resultante da curva de rotação kepleriana depende especificamente dessa suposição: trate-se de força gravitacional exercida por uma massa puntiforme. Já em uma galáxia, não é verdade que a massa esteja concentrada em um único ponto central: a massa das estrelas está distribuída por todo o disco estelar.¹

Em princípio, não poderíamos aplicar uma conta tão simples como a equação 1 em galáxias. No entanto, ocorre que a massa do disco estelar, embora não puntiforme, é bastante concentrada na região central. De fato, veremos mais adiante que a densidade de estrelas decresce exponen-

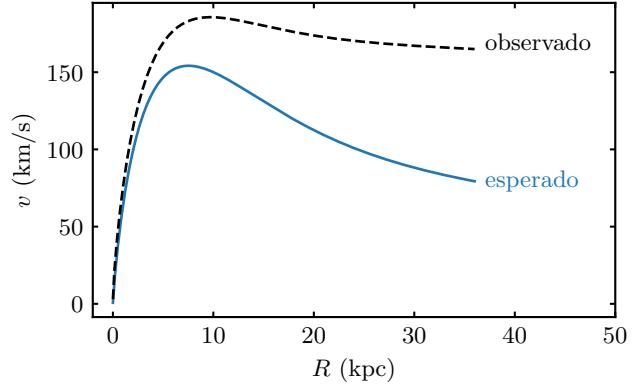


Figura 2: Representação esquemática comparando a curva de rotação esperada (caso só existisse a massa do disco) e uma a curva de rotação típica observada em galáxias espirais.

almente com o raio. Ou seja, a maior parte da massa estelar está nas regiões centrais, e não na periferia do disco. Imagine que nós vamos nos afastando do centro da galáxia e, em cada raio R , notamos qual é a massa interna a esse raio. Rapidamente, essa massa interna se aproxima da massa total. Seria válido substituir a massa interna a essa esfera por um ponto na origem? A rigor, não, pois o sistema não é esférico. Recorremos os resultados do teorema de Newton para cascas esféricas: (i) Toda a massa interna a um raio R pode ser substituída por um ponto na origem; (ii) Toda a massa externa a um raio R não exerce força gravitacional nenhuma.

Esses resultados só se aplicam a uma distribuição esférica de massa, o que claramente não é o caso para um disco estelar. Embora não seja exatamente correto substituir a massa interna a essa esfera por um ponto na origem, é uma primeira aproximação tolerável. Ainda mais, visto que nosso interesse principal está justamente nos grandes raios. Se estivermos suficientemente longe do centro galáctico, o erro incorrido não é tão grande. O formato exato da curva de rotação no centro será estudado mais adiante. E inclusive ele levará em conta o bojo, que é efetivamente esférico.

A conclusão, por enquanto, é que o formato da curva $v(R)$ para grandes raios deveria ser semelhante à curva kepleriana $v(R) \propto R^{-1/2}$. Em outras palavras, a velocidade orbital das estrelas deveria diminuir intensamente em função do raio. Aqui vem o resultado fundamental: os dados observacionais indicam que não é isso que ocorre.

¹Galáxias em geral têm em seus centros um buraco negro supermassivo, mas ele é pouco relevante para dinâmica galáctica como um todo. Como a massa desse buraco negro é relativamente pequena ($\sim 10^6 M_\odot$) diante da massa total da galáxia ($\sim 10^{12} M_\odot$), a sua influência gravitacional se limita a uma vizinhança imediata relativamente pequena. Para estrelas orbitando a alguns kiloparsecs, é indiferente que exista um buraco negro supermassivo.

Pelo contrário, a velocidade das estrelas continua sendo muito alta, mesmo em grandes raios. A Fig. 2 mostra esquematicamente essa situação. A curva de rotação azul é o que se esperaria para um disco estelar. A curva preta é o que de fato se observa. Isso é o que chamamos de uma curva de rotação “plana”, isto é, a velocidade continua com um valor aproximadamente constante em função do raio. Para galáxias do porte da Via Láctea, esse valor é próximo de 200 km/s.

Algumas breves ressalvas observacionais. Ao introduzir o tópico de curvas de rotação, nos referimos às estrelas do disco. No entanto, o disco estelar não se estende muito além de 15 kpc — considerando galáxias do mesmo porte da Via Láctea. Depois desse raio, as estrelas são muito escassas e seria difícil medir precisamente suas velocidades. Medidas de velocidades de estrelas restritas a raios pequenos seriam inconclusivas, pois não permitiriam distinguir conclusivamente um desvio do regime kepleriano. Já o disco gasoso geralmente se estende para além do disco estelar, até raios maiores. Então na realidade as medidas de velocidades do gás (feitas em rádio) é que são cruciais para caracterizar a região externa. Outro detalhe observational é que, por razões diversas, as curvas de rotação das galáxias observadas não são exatamente planas. Algumas podem ser levemente crescentes, outras levemente decrescentes e outras planas dentro das incertezas de medição. O que importa é que, como um todo, elas não decaem fortemente em grandes raios e são incompatíveis com uma curva kepleriana.

2.3 A necessidade de matéria escura

Por que essas altas velocidades exigem a presença de mais massa? Na equação 1, vemos que as velocidades serão maiores se M for maior. No caso do sistema solar, aquele M era uma constante: a massa do Sol.² No caso da galáxia, seria a massa $M(r)$ contida dentro de cada raio esférico r . Se essa massa fosse meramente estelar, as velocidades deveriam ser baixas. Para as velocidades serem altas como indicam as observações, é necessário que exista mais massa. Essa massa

²Essa relação é amplamente empregada em várias áreas da Astronomia, como um método de determinação de massa. Por exemplo, medindo as velocidades orbitais das luas de Júpiter e seus respectivos raios, é possível calcular a massa de Júpiter usando a equação 1.

“faltante” é a matéria escura. E ela resulta ser bem maior que a soma das massas das estrelas.

Veremos na seção 3 que a matéria escura está distribuída na forma de um halo. Esse halo³ é uma estrutura aproximadamente esférica, bem maior que a parte visível da galáxia. Se numa galáxia do porte da Via Láctea as estrelas do disco alcançam não muito mais que 15 kpc, o halo de matéria escura alcança cerca de 200–250 kpc. É importante perceber que o halo não é uma casca esférica oca que envolve a galáxia: ele permeia a galáxia como um todo. É uma distribuição contínua de massa. O halo é mais denso no centro e mais rarefeito na borda, como geralmente acontece com sistemas astronômicos autogravitantes. Isso significa que deve haver matéria escura por toda a galáxia. O Sol encontra-se a cerca de 8 kpc do centro da Via Láctea. Podemos estimar que, aqui na vizinhança solar, a densidade de matéria escura corresponderia a cerca de $0,07 M_{\odot}/pc^3$. Essa densidade pode parecer muito baixa em contextos não-astronômicos: menos de $5 \times 10^{-24} g/cm^3$, ou seja, o equivalente a alguns prótons por centímetro cúbico. No âmbito do sistema solar, essa densidade se traduziria em algo da ordem de 1 asteroide (digamos, Vesta) dentro do volume da órbita de Netuno. Está claro que a massa de um único asteroide a mais ou a menos não modificaria a dinâmica do sistema solar. Por esses motivos, é consistente com o nosso entendimento atual o fato de que a presença da matéria escura não se manifeste perceptivelmente nessas pequenas escalas. É apenas na escala galáctica como um todo que os volumes são suficientemente imensos para que a massa da matéria escura seja uma contribuição não apenas relevante, mas dominante.

O halo de matéria escura (com massa, densidade e tamanho detalhados na seção 3) é, por-

³Existe também uma estrutura chamada de halo estelar, que corresponde a estrelas que não fazem parte do disco estelar, mas que estão distribuídas esfericamente ao redor do centro galáctico. O halo estelar é interessante para estudos de formação e evolução galáctica, pois lá estão os aglomerados globulares, que são associações de estrelas muito antigas. No entanto, como a massa do halo estelar é da ordem de apenas 1% da massa do disco, ele pode ser ignorado em primeira aproximação ao se fazer uma modelagem dinâmica. O halo estelar não tem a ver com o halo de matéria escura. Ambos têm o nome de halo apenas porque trata-se de distribuições esféricas “ao redor” da galáxia.

tanto, necessário para explicar as velocidades observadas nas curvas de rotação — velocidades estas que seriam incompreensíveis de outra forma, diante das leis da física conhecidas. Uma outra abordagem seria questionar se as leis da física estão erradas.

Uma analogia histórica frequentemente usada para ilustrar esse dilema consiste em narrar dois problemas astronômicos que foram detectados no fim do século XIX. Um deles era uma pequena discrepância na órbita de Urano, que levou à descoberta de Netuno — na realidade, levou à previsão teórica de que Netuno precisava existir. Neste caso, mantivemos as leis da física (mecânica newtoniana) e postulamos a existência de uma massa até então não detectada (Netuno). Se essa massa postulada fosse levada em conta nos cálculos, as perturbações gravitacionais induzidas por ela reconciliariam a teoria com os dados observacionais. Como sabemos, essa abordagem teve sucesso e Netuno foi detectado com telescópios logo em seguida, muito próximo da posição prevista. Esse evento pode ser considerado um dos mais estrondosos triunfos da mecânica clássica e quiçá da física como um todo.

O outro problema orbital no século XIX era, famosamente, o da órbita de Mercúrio. Os sintomas desse problema eram similares ao descrito anteriormente, mas a tentativa de aplicar a mesma solução revelou-se infrutífera: não existe uma massa extra (um hipotético planeta Vulcano) próxima do Sol e causando perturbações gravitacionais na órbita de Mercúrio. Nesse caso, não se tratava de postular uma massa faltante. Foi só com o advento da relatividade geral no começo do século XX que se pôde finalmente compreender a órbita de Mercúrio. A física newtoniana não é suficiente para explicar com precisão movimentos tão próximos de um potencial gravitacional do porte do Sol. A relatividade geral veio substituir a física newtoniana como a melhor explicação que conhecemos para fenômenos gravitacionais.

Dante dessas histórias, onde se encaixa o atual mistério da matéria escura? As opções são: manter as leis da física e incluir uma massa faltante nos cálculos; ou encontrar novas leis da física. Atualmente, o consenso entre os astrônomos é que estamos diante de uma situação como a primeira, a de Netuno. Não se conhece, nos dias de hoje, motivos convincentes para abandonar a te-

oria da relatividade geral, que vem sobrevivendo a todos os severos testes a que a submetemos durante um século. Uma nova teoria de gravidade que tivesse a pretensão de a suplantar precisaria explicar todos os fenômenos atualmente explicados com estupendo êxito pela relatividade geral e, além disso, explicar outros fenômenos e ainda fazer novas previsões. Pode ser que um dia uma tal nova teoria seja alcançada, mas atualmente não conhecemos algo assim. Se a relatividade geral segue sendo a melhor teoria disponível, então é necessário que existam halos de matéria escura.

Embora a necessidade da matéria escura tenha se estabelecido na astronomia inicialmente através das curvas de rotação de galáxias espirais, as evidências observacionais hoje em dia são provenientes de diferentes fontes, em diferentes escalas. A explicação detalhada de cada uma dessas evidências está além do escopo do presente texto, mas podemos citar brevemente as seguintes. Em aglomerados de galáxias, temos as massas determinadas via lentes gravitacionais, via temperatura do gás observado em raios-X, e dinamicamente via teorema do virial com as velocidades das galáxias — este último, o método empregado por Zwicky nos anos 1930. Já na escala cosmológica, temos evidências de matéria escura na abundância primordial de hélio, na radiação cósmica de fundo, e na própria formação de estruturas em larga escala — para citar apenas algumas. O importante é que diversas dessas fontes de informação são independentes entre si. E no entanto, todas apontam não apenas para a necessidade de uma massa não-bariônica,⁴ mas quantitativamente para uma proporção específica. Esse acordo entre resultados independentes é notável e torna difícil hoje em dia abandonar a matéria escura. É possível argumentar que as evidências cosmológicas talvez sejam as mais fortes atualmente.

Dante desse cenário, vale a pena enfatizar que — do ponto de vista prático — estamos operando no regime não-relativístico, onde a mecânica clássica é sem dúvida suficiente para os tópicos de

⁴No jargão da astronomia, chamamos de bárions tudo aquilo que tenha massa e que não seja matéria escura ou neutrinos. É claramente um abuso de linguagem, em dessonância com o léxico dos físicos. No entanto, para fins do saldo total de massa do Universo, não vale a pena separar os elétrons e neutrinos do resto.

dinâmica galáctica. Por exemplo, em buracos negros e outros objetos compactos o potencial gravitacional é muito profundo, o que exige a aplicação da relatividade geral. Já em galáxias, a gravitação newtoniana é uma aproximação suficiente. Embora a massa de uma galáxia seja grande, essa massa está espalhada por distâncias imensas, o que faz com que a galáxia não seja um sistema tão denso. Em outras palavras, não se trata de um poço de potencial gravitacional tão acentuado. Em suma, um sistema de $\sim 10^{12} M_{\odot}$, com órbitas de ~ 100 km/s a 10 kpc é plenamente não-relativístico, para todos os fins práticos.

Outro esclarecimento diz respeito ao termo kepleriano. As leis de Kepler carregam esse nome por razões históricas, mas em última análise sabemos que são uma decorrência direta da gravitação newtoniana, aplicada ao problema de 2 corpos. Quando dizemos que a curva de rotação é não-kepleriana isso não significa dizer que trata-se de algum desvio com relação à mecânica clássica, muito menos nova física ou teorias alternativas de gravidade. Dizer que a curva de rotação não é kepleriana significa apenas que a dependência funcional não é $v \propto R^{-1/2}$, ou seja, que não se aplica a aproximação de massas puntiformes. Mas certamente continuamos no regime da gravitação newtoniana. O elemento que deixa de ser satisfeito é apenas a suposição de que a massa total M estaria concentrada num ponto central; essa suposição precisa ser substituída por uma distribuição contínua de massa $M(r)$. Portanto, nossa interpretação atual é que a não-keplerianidade indica que faltava levar em conta uma componente extensa de massa (o halo de matéria escura).

3 Perfil de densidade da matéria escura

Para explicar a curva de rotação não-kepleriana observada, não basta que a matéria escura exista e não basta que tenha grande massa. É necessário, também, que ela tenha uma distribuição radial específica. Isto é, se a matéria escura estivesse concentrada em um ponto central, isso não resolveria o problema.

Agora precisamos nos debruçar sobre uma questão específica: como exatamente se distribui a matéria escura radialmente? O único dado observacional de que dispomos pode parecer pobre

em informação: v é constante com o raio — nada mais. Surpreendentemente, é possível extrair características interessantes do halo de matéria escura apenas com esse dado aparentemente pouco promissor.

3.1 Massa cumulativa

Para isso, vamos considerar o conceito de massa cumulativa $M(r)$, que é a massa contida dentro de uma esfera de raio r . Às vezes, também é usada a notação $M(<r)$ para enfatizar que trata-se de toda a massa em raios menores que r : desde o centro até aquele r .

No sistema solar, se tomarmos sucessivas esferas de raio r , a massa contida em cada esfera será sempre a mesma: a massa do Sol. É por isso que M era uma constante na equação 1. Já na galáxia, cada esfera de raio r contém uma massa $M(r)$ interna àquele raio. É claro que, em função de r , essa função só pode ser monotonicamente crescente, até que se atinja a massa total. Agora, a velocidade circular será:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \quad (2)$$

Podemos nos perguntar qual deve ser a forma funcional da função $M(r)$ para que a velocidade resulte ser uma constante. Ora, é fácil ver que se $M(r)$ for linearmente crescente com r , obtemos o comportamento desejado:

$$\begin{aligned} M(r) &\propto r \\ v(r) &= \text{cte.} \end{aligned}$$

O que significa dizer que a massa “cresce” com o raio? Significa que cada r contém mais massa cumulativa que o r anterior. Ou seja, ainda há halo de matéria escura nas regiões onde curvas de rotação estão sendo medidas, já que cada próxima esfera ainda abarca uma certa massa adicional, com relação à esfera anterior. No entanto, isso certamente não significa que o halo seja mais denso em raios maiores: pelo contrário, a densidade cai com o raio.

Agora precisamos esclarecer como densidade se conecta com massa. Vamos imaginar inicialmente uma configuração simples (e errada): suponha que o halo seja uma esfera de densidade uniforme. Nesse caso, poderíamos fazer um cálculo simples

em cada raio:

$$\text{massa} = \text{densidade} \times \text{volume}$$

Em cada dado raio, o volume da esfera é $\frac{4}{3}\pi r^3$, então a massa interna àquele raio seria simplesmente uma densidade constante $\rho = \text{cte}$ multiplicada por $\frac{4}{3}\pi r^3$. Nesse caso,

$$\begin{aligned} M(r) &= \rho \frac{4}{3}\pi r^3 \\ M(r) &\propto r^3 \end{aligned}$$

Colocando esse $M(r)$ na equação 2, resulta uma velocidade não-constante:

$$v \propto \sqrt{\frac{r^3}{r}} \propto r,$$

o que contraria a curva de rotação plana e mostra que o halo não pode ser uma esfera uniforme. Precisa haver alguma dependência radial $\rho(r)$ no perfil de densidade.

Como calcular massa cumulativa de uma esfera em que a densidade depende do raio conforme $\rho(r)$? Continua sendo verdade que a massa é densidade multiplicada por volume. Porém, agora a conta precisa ser feita em cada raio, dentro de uma casca esférica de raio r e de espessura infinitesimal dr . Podemos considerar que o volume dessa casca esférica é sua área $4\pi r^2$ multiplicada pela sua espessura dr :

$$\begin{aligned} dV &= A dr \\ dV &= 4\pi r^2 dr \end{aligned}$$

Este volume dV multiplicado pela densidade naquele raio $\rho(r)$ dará a massa contida na casca:

$$dM = 4\pi r^2 \rho(r) dr.$$

Agora basta somar todas as cascas desde o centro até um dado r :

$$M(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho(r') dr'. \quad (3)$$

Repare que a integral está sendo feita na variável r' . Os extremos de integração são desde $r' = 0$ até $r' = r$. Este r é o que aparece no resultado $M(r)$: é a massa cumulativa desde 0 até um dado r .

Com esse raciocínio, conseguimos na equação 3 a relação geral entre uma densidade qualquer $\rho(r)$ e sua massa cumulativa, para um perfil esférico.

Agora podemos nos perguntar qual é a dependência funcional específica $\rho(r)$ que leva ao $M(r)$ desejado: $M(r) \propto r$. Bem, parece fisicamente razoável que $\rho(r)$ diminua com r . Portanto faz sentido considerar expoentes negativos em r . Em particular, o ansatz $\rho(r) \propto r^{-2}$ é especialmente simples, pois faz sobrar apenas a integral de uma constante, em r' , que dá r :

$$\begin{aligned} M(r) &= \int_0^r k dr' \\ M(r) &= k r, \end{aligned}$$

onde k é uma constante.

Diante disso, concluímos que o halo de matéria escura deveria ter uma densidade que cai com o quadrado do raio, ao menos nas regiões mais externas, onde a curva de rotação é medida. Se o perfil de densidade for aproximadamente desse tipo, resultará uma curva de rotação aproximadamente plana.

Esses cálculos nos dão uma intuição bastante útil sobre perfis de densidade da matéria escura. No entanto, cabe a ressalva de que esses argumentos não devem ser entendidos como uma demonstração teórica — entre outros motivos porque a planaridade da curva de rotação não é uma exigência matemática exata; é apenas uma simplificação baseada num vínculo observacional. É um vínculo qualitativamente importante, porém quantitativamente aproximado. Em outras palavras, a suposta dependência $1/r^2$ não é uma exigência física precisa; é apenas um argumento motivador dos tipos de perfis de densidade plausíveis. Veremos a seguir que, para os perfis mais realistas, a potência de r não é única ao longo de todo o halo.

3.2 Perfil de Hernquist

Um perfil de densidade frequentemente usado em astronomia extragaláctica é o chamado perfil de Hernquist [4]. É útil para representar um halo de matéria escura. A dependência funcional do perfil de densidade de Hernquist é:

$$\rho(r) = \frac{M_h}{2\pi} \frac{a_h}{r} \frac{1}{(r + a_h)^3}, \quad (4)$$

onde M_h é a massa total do halo, e a_h é um comprimento de escala. Esse a_h não é um tamanho de alguma estrutura física específica. Ele deve

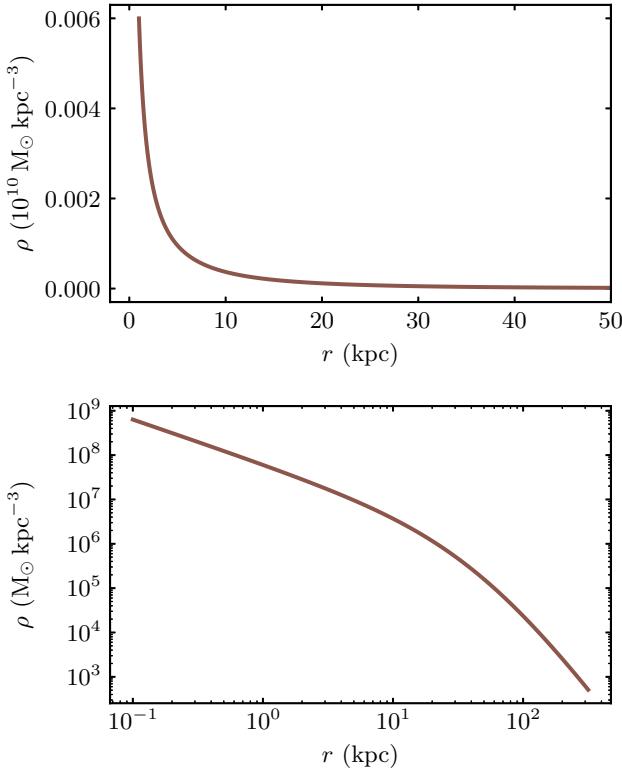


Figura 3: Perfil de densidade de Hernquist (equação 4). O painel superior mostra eixos lineares, e o painel inferior mostra a mesma função com eixos logarítmicos. Note que os intervalos radiais exibidos são diferentes.

ser entendido como um parâmetro que controla o quanto o halo é centralmente concentrado. Um halo com uma dada massa fixa M_h poderia ser mais concentrado (a_h pequeno), ou mais difuso (a_h grande).

A Fig. 3 mostra a equação 4 primeiro em escala linear, para enfatizar o seu rápido decaimento desde o centro; e em seguida em escala logarítmica, para exibir os diferentes regimes. Neste exemplo, foram usados os parâmetros $M_h = 10^{12} M_\odot$ e $a_h = 44 \text{ kpc}$, que são apropriados para representar o halo de matéria escura de uma galáxia do porte da Via Láctea. Nota-se no painel inferior da Fig. 3 que a inclinação muda de comportamento nas imediações de $r = a_h$, sendo mais suave no centro e mais acentuada na região externa.

Podemos inspecionar os limites da equação 4, rearranjando os termos para explicitar a razão r/a_h :

$$\rho(r) = \frac{M_h}{4\pi a_h^3} \frac{1}{r} \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{a_h}\right)^3} \quad (5)$$

Quando o raio é muito pequeno ($r/a_h \ll 1$), podemos aproximar⁵ o termo ao cubo por:

$$\left(1 + \frac{r}{a_h}\right)^{-3} \simeq 1 - 3\frac{r}{a_h}$$

Resulta, para raios pequenos, que $\rho(r) \propto r^{-1}$. Já para raios muito grandes ($r/a_h \gg 1$), basta notar que:

$$\left(1 + \frac{r}{a_h}\right)^3 \simeq \left(\frac{r}{a_h}\right)^3 \quad (6)$$

Daí resulta $\rho(r) \propto r^{-4}$. Em suma, comportam-se da seguinte forma os regimes interno e externo do perfil de densidade de Hernquist:

$$\begin{aligned} \rho(r) &\propto \frac{1}{r} && \text{se } r \ll a_h \\ \rho(r) &\propto \frac{1}{r^4} && \text{se } r \gg a_h \end{aligned}$$

Obviamente, a transição não é abrupta, pois trata-se de uma função suave, que passa gradualmente pelas inclinações intermediárias.

Na realidade, este perfil de Hernquist poderia ser visto como um caso particular de uma família mais geral de perfis com duas leis de potência.⁶ Genericamente, poderíamos escrever:

$$\rho(r) = \rho_0 \frac{1}{\left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{a}\right)^{\beta-\alpha}}, \quad (7)$$

com limites:

$$\begin{aligned} \rho(r) &\propto \frac{1}{r^\alpha} && \text{se } r \ll a \\ \rho(r) &\propto \frac{1}{r^\beta} && \text{se } r \gg a \end{aligned}$$

O perfil de Hernquist é o caso particular onde $\alpha = 1$ e $\beta = 4$.

Tendo caracterizado o perfil de densidade, podemos seguir adiante usando a equação 3 para calcular a sua massa cumulativa de Hernquist. Resulta ser uma expressão simples:

$$M(r) = M_h \left(\frac{r}{r + a_h}\right)^2 \quad (8)$$

Substituindo essa massa cumulativa na equação 2, obtemos a velocidade circular associada a esse perfil:

$$v(r) = \frac{\sqrt{GM_h r}}{r + a_h} \quad (9)$$

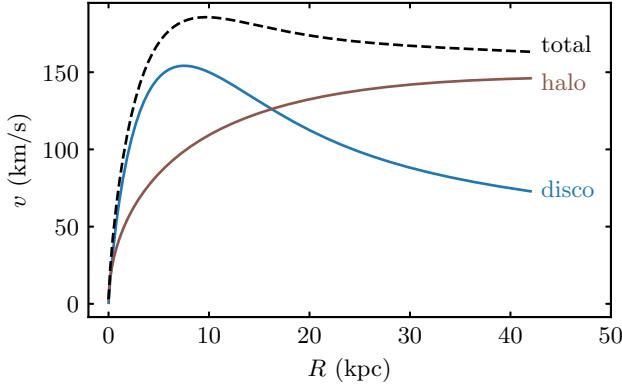


Figura 4: Contribuições do disco estelar e do halo de matéria escura para a curva de rotação total. A curva marrom corresponde a um halo com o perfil de Hernquist (equação 9).

Na Fig. 4, a curva marrom corresponde à equação 9, isto é, representa a velocidade devida à massa do halo de matéria escura. A curva azul representa a velocidade devida ao disco estelar. Veremos adiante como exatamente essas contribuições se compõem para dar a curva de rotação total. Por enquanto, a Fig. 4 é suficiente para apreciar como a presença de um halo de matéria escura — com um perfil de densidade apropriado — consegue explicar a curva de rotação observada. Percebemos que a contribuição proveniente do disco estelar existe e é, sim, aproximadamente kepleriana em grandes raios. Ocorre que o disco não é a única contribuição.

O perfil de Hernquist não decorre diretamente de princípios primeiros da física. Deve ser entendido como um modelo fenomenológico, ou como uma proposta de dependência funcional, que vem a ser conveniente pela sua simplicidade analítica e por representar razoavelmente bem as estruturas em questão.

3.3 Perfil de Navarro–Frenk–White

Um outro perfil de densidade amplamente usado para representar halos de matéria escura é o chamado perfil de Navarro–Frenk–White, ou NFW [6]. Esse perfil também não é deduzido da física fundamental, mas tem uma origem peculiar: a equação que o descreve pode ser entendida como um “ajuste empírico”. Porém aqui não estamos nos referindo a dados observacionais do

⁵Lembrando que $(1+x)^\alpha \simeq 1 + \alpha x$, se $x \ll 1$.

⁶Ver a seção 3.4.6 da referência [5].

Universo real, mas sim de universos simulados.

Simulações cosmológicas são cálculos numéricos onde acompanhamos a evolução gravitacional, em função do tempo, das estruturas em larga escala.⁷ A condição inicial é um cubo cujo volume seja comparável a uma fração representativa do Universo observável — ou ao menos uma escala acima da qual o Universo pode ser considerado homogêneo. As faces do cubo são condições de contorno periódicas. Em seu interior, há partículas (no sentido computacional) representando a distribuição de massa do Universo jovem, pouco tempo depois do Big Bang — essa é a condição inicial da simulação. As partículas podem representar gás e matéria escura nas simulações feitas atualmente; porém as simulações mais antigas usavam apenas matéria escura e obtinham resultados já muito próximos da real distribuição de galáxias. No Universo jovem, a densidade era quase a mesma em todos os pontos do espaço, a menos de pequenas flutuações locais — regiões levemente mais densas que a média, e regiões levemente menos densas que a média. Graças à ação aglutinadora da gravidade, com o passar dos bilhões de anos, as regiões sobredensas sofrem colapso gravitacional e vão dar origem aos halos de matéria escura que, por sua vez, hospedam as galáxias. O resultado é que, ao longo de quase 14 bilhões de anos, o Universo que começou homogêneo termina nos dias atuais repleto de halos de matéria escura. Isto é, os halos de matéria escura formam-se “espontaneamente” dentro da simulação cosmológica. Os ingredientes são: gravidade e uma distribuição inicial de massa quase homogênea.

Com os dados provenientes dessas simulações cosmológicas, é possível medir diretamente os perfis de densidades dos halos de matéria escura. Basta centralizar cada halo na origem de um sistema de coordenadas e medir a densidade em função do raio: na prática, isso consiste em medir a massa contida dentro de sucessivas cascas esféricas, e dividi-la pelo volume de cada casca. Isso nos dá $\rho(r)$ medido numericamente. Essa análise aplicada para halos de diferentes massas revelou que a seguinte função ajusta muito bem o perfil de densidade que emergiu espontaneamente das

⁷Uma revisão do estado atual das grandes simulações cosmológicas pode ser encontrada em [7].

simulações:

$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{\left(\frac{r}{r_s}\right)\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2} \quad (10)$$

Esse é o perfil de NFW. Percebemos que, comparado com a equação 7, trata-se de um caso particular onde $\alpha = 1$ e $\beta = 3$. Portanto, o perfil de NFW tem comportamento assintótico de $\rho \propto r^{-3}$ em grandes raios. A parametrização aqui é outra: os parâmetros são r_s , que é um comprimento de escala (diferente de a_h); e ρ_s que é uma densidade característica. Repare que ρ_s não é a densidade central; afinal, nem existe densidade finita em $r \rightarrow 0$. É o que chamamos de *cusp* (cúspide): quando a densidade cresce acentuadamente em direção ao centro. Se a densidade tendesse a um valor constante para $r = 0$, diríamos que o perfil tem um *core* (caroço).

Na realidade, é mais comum re-expressar r_s em termos de um parâmetro adimensional c , chamado concentração, que é definido da seguinte forma:

$$c = \frac{r_{200}}{r_s} \quad (11)$$

Quanto menor r_s , maior a concentração. Mas agora precisamos definir esta importante grandeza que é o r_{200} , chamado de raio do virial. A definição é a seguinte. O raio do virial é o raio da esfera dentro da qual a densidade média vale 200 vezes a densidade crítica do Universo. Essa densidade crítica é uma grandeza que vem da cosmologia e está relacionada com a expansão do Universo. Para nossos propósitos imediatos, ρ_{cr} pode ser entendido como uma constante da natureza; serve como uma certa densidade de referência. Seu valor vem a ser:

$$\rho_{cr} = \frac{3H_0}{8\pi G} = 9.2 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3, \quad (12)$$

onde H_0 é a constante de Hubble⁸ e G é a constante de gravitação universal. Uma vez definido o raio do virial, a massa do virial M_{200} é simplesmente a massa contida dentro da esfera de raio r_{200} . É simples conectar M_{200} e r_{200} :

$$\frac{M_{200}}{\frac{4\pi}{3}r_{200}^3} = 200 \rho_{cr} \quad (13)$$

⁸Aqui foi adotado o valor aproximado da constante de Hubble $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Essa relação também serve para ressaltar que a densidade que importa para o critério de 200 ρ_{cr} não é a densidade *em* um dado r , mas sim a densidade *média* dentro da esfera: toda a massa interna dividida por todo o volume.

O fator numérico 200 poderia, à primeira vista, ser aceito como uma convenção arbitrária, que serve para definir quantitativamente tamanhos de estruturas difusas que não têm fronteiras nítidas. Afinal, não há um raio bem definido onde acaba por completo a massa de uma galáxia; a densidade poderia decrescer indefinidamente. Mas na realidade, essa sobredensidade de 200 ρ_{cr} tem uma motivação dentro da teoria de formação de estruturas: é aproximadamente esse limiar que determina se uma perturbação irá colapsar localmente. Então na prática, esse critério acaba sendo apropriado para definir o tamanho da região dentro da qual deve valer o equilíbrio dinâmico. Quando um sistema está em equilíbrio dinâmico, dizemos que está “virializado”.

Voltando ao c , podemos nos perguntar se um halo de dada massa M_{200} poderia ter qualquer concentração. Do ponto de vista da equação genérica, até poderia. Mas aqui temos mais uma importante relação empírica proveniente das simulações cosmológicas. Com os resultados das simulações, foi possível obter r_s ajustando o perfil NFW para qualquer halo. O r_{200} mede diretamente em cada halo simulado. Assim, tem-se c medido para todos os halos. Um gráfico de c em função de M_{200} revela que existe uma correlação bem definida entre essas duas grandezas, no sentido de que os halos de alta massa são menos concentrados. Essa relação vale desde massas de galáxias (com c por volta de 8 ou mais), até massas de aglomerados de galáxias (com c por volta de 4). Uma das referências muito usadas para esse fim é [8], cujo ajuste entre c e M_{200} pode ser expresso assim:⁹

$$c = \frac{6.71}{(1+z)^{0.44}} \left(\frac{M_{200}}{2.9 \times 10^{12} M_\odot} \right)^{-0.091}, \quad (14)$$

onde z é o redshift. No Universo local (dias de hoje), o redshift é $z = 0$. A Fig. 5 mostra a equação 14 para $z = 0$.

⁹Aqui também já foi adotado o valor aproximado $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Ver na referência [9] outras expressões e outros gráficos para a concentração.

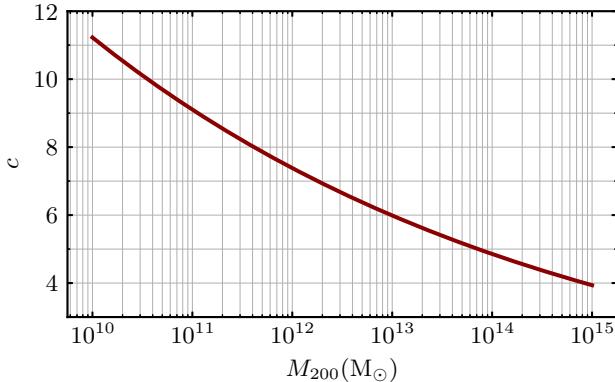


Figura 5: Relação entre concentração e massa do virial (equação 14 para redshift $z = 0$), segundo o ajuste de [8].

Essas parametrizações podem parecer indiretas, mas o resultado então é que tudo decorre diante de um único dado de entrada: o M_{200} . Dele decorre a concentração pela equação 14; decorre r_{200} pela equação 13; e decorre r_s pela equação 11. Por fim, ρ_s também pode ser obtido univocamente, sem liberdade de escolha adicional:

$$\rho_s = \frac{200}{3} \rho_{\text{cr}} \frac{c^3}{[\ln(1+c) - c/(1+c)]} \quad (15)$$

Note que ρ_s fica completamente determinado por c . Então poderíamos enxergar o numerador da equação 10 como sendo uma mera função de c multiplicada por uma constante. A maneira de chegar na equação 15 é: calcular a massa cumulativa $M(r)$ de NFW, avaliá-la em $r = r_{200}$, e isolar ρ_s . Fica como exercício para o leitor fazer a integral:

$$M(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \frac{\rho_s}{\left(\frac{r'}{r_s}\right) \left(1 + \frac{r'}{r_s}\right)^2} dr'. \quad (16)$$

Para isso, faz-se a mudança de variável $r/r_s = cx$. O resultado é:

$$M(r) = 4\pi \rho_s \frac{r_{200}^3}{c^3} \left[\frac{1}{1 + \frac{r}{r_s}} + \ln\left(1 + \frac{r}{r_s}\right) - 1 \right] \quad (17)$$

Essa massa cumulativa pode ser substituída na equação 2, o que dá a velocidade circular devida ao perfil NFW.

Na Fig. 6 são comparados os perfis de Hernquist e de NFW. No painel superior, vemos que eles coincidem na região central e começam a se afastar para grandes raios, com o NFW caindo mais lentamente ($\propto r^{-3}$) do que o Hernquist,

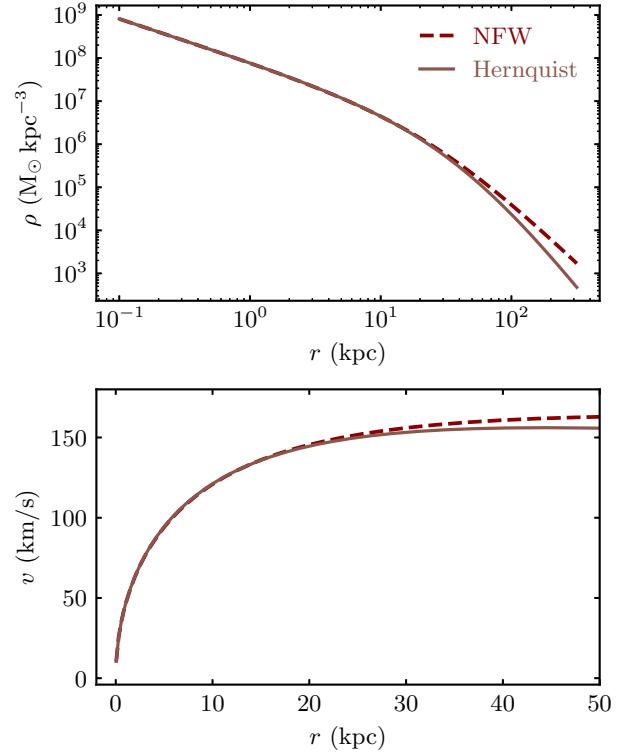


Figura 6: Comparaçao entre os perfis de densidade de Hernquist e de NFW. O painel inferior mostra as respectivas curvas de rotação.

que cai de maneira mais acentuada ($\propto r^{-4}$). De fato, essa dependência tem uma consequência um pouco inconveniente: a massa total do perfil NFW não converge. Apesar dessa inconveniência matemática, o perfil NFW é muito usado, pois o conceito massa do virial é mais relevante do que o conceito de “massa total”. Do ponto de vista numérico, costuma-se aplicar algum truncamento arbitrário dependendo da aplicação. Ao mesmo tempo, constatamos na Fig. 6 que o perfil de Hernquist é uma aproximação bastante satisfatória. A região onde ele discorda de NFW é uma região de relativa baixa densidade, o que dificilmente acarretaria grandes diferenças do ponto de vista dinâmico.

A dinâmica na região onde se encontra a galáxia (disco de estrelas e gás) é evidenciada na curva de rotação, no painel inferior da Fig. 6. Aí percebemos também que ambos os perfis resultam em curvas de rotação com as propriedades desejadas, e bastante similares entre si.

Um último detalhe da relação entre os dois perfis. Para que eles de fato coincidam no centro, é necessária uma escolha adequada do parâmetro

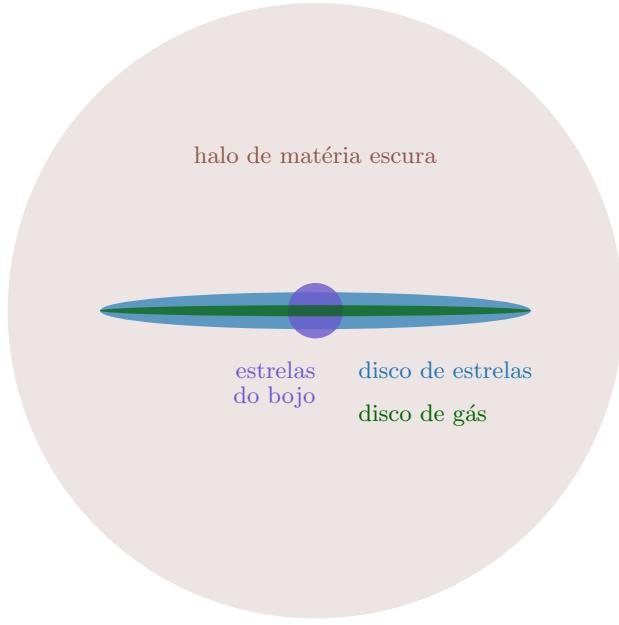


Figura 7: Representação esquemática das 4 componentes de massa usadas no modelo composto. Note que as dimensões espaciais não estão em escala proporcional. Em particular, o halo de matéria escura deveria ser cerca de 15 vezes maior que a parte visível da galáxia.

a_h , o comprimento de escala de Hernquist. Escrevendo as duas aproximações de pequenos raios (isto é, $r \ll r_s$ e $r \ll a_h$) e exigindo que essas aproximações coincidam, é possível obter a relação entre os comprimentos de escala:

$$\frac{a_h}{r_s} = \sqrt{2 [\ln(1 + c) - c/(1 + c)]} \quad (18)$$

4 Um modelo composto

Na seção anterior, caracterizamos detalhadamente a distribuição de matéria escura, na forma de um halo esférico com perfil de densidade específico. Agora, podemos colocar esse halo no contexto das demais componentes de uma galáxia espiral. Assim, vamos completar um modelo dinâmico de uma galáxia composta de (i) halo de matéria escura, (ii) disco estelar, (iii) disco de gás, e (iv) estrelas do bojo. Cada um desses componentes tem a sua massa e essa massa está distribuída de uma certa maneira. O halo de matéria escura já está estabelecido. A seguir, vamos caracterizar as componentes bariônicas.

4.1 Disco estelar

Precisamos de uma função que descreva como a massa do disco estelar está distribuída espacialmente. Pela geometria do disco, é conveniente usar coordenadas cilíndricas: o raio cilíndrico R e a altura z . Uma maneira usual de modelar o perfil de densidade de um disco estelar é a seguinte.

$$\rho(R, z) = \frac{M_d}{4\pi R_d^2 z_d} e^{-R/R_d} \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_d}\right) \quad (19)$$

onde M_d é a massa do disco estelar. Olhando para a parte radial, vemos que a densidade diminui exponencialmente com o raio, e o ritmo dessa queda é controlado pelo comprimento de escala R_d . Não acontece nada fisicamente especial nesse raio; é apenas o raio onde a densidade central terá caído por um fator $1/e$. Já na parte vertical, pode parecer exótica a dependência com a secante hiperbólica. Ocorre que essa função (ao quadrado) se assemelha a uma exponencial, mas com a vantagem de ter um topo suave. Isso significa que, verticalmente, a densidade de estrelas diminui quase exponencialmente com a altura z . Por construção, esse perfil é simétrico com relação ao plano $z = 0$. O parâmetro z_d regula a espessura do disco estelar. A equação 19 pode ser aceita com uma motivação observational: é uma dependência funcional simples que representa bem os perfis (de luz) medidos em galáxias espirais observadas.

Para certos fins, é desejável ter uma grandeza projetada, que dependa só de R . Projetar toda a massa no plano $z = 0$ significa integrar a equação 19 ao longo de todos os z :

$$\Sigma(R) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(R, z) dz \quad (20)$$

O resultado é a densidade superficial de massa (massa dividida por área). Como a dependência com z desaparece, sobra apenas a dependência com R :

$$\Sigma(R) = \frac{M_d}{2\pi R_d^2} e^{-R/R_d} \quad (21)$$

Se precisássemos de uma massa cumulativa, poderíamos usar não esferas, mas sim anéis. Considere um anel de raio R e largura infinitesimal dR . A área desse anel será $dA = 2\pi R dR$. Por isso, a massa cumulativa dentro de anéis de raio R será:

$$M(R) = \int_0^R 2\pi R' \Sigma(R') dR' \quad (22)$$

Substituindo o $\Sigma(R)$ da equação 21, resulta a massa cumulativa do disco exponencial:

$$M(R) = M_d \left[1 - \left(1 + \frac{R}{R_d} \right) e^{-R/R_d} \right] \quad (23)$$

Até aqui, fizemos somente operações lícitas com o perfil exponencial. O próximo passo é, a rigor, inválido. Consiste em fingir que a massa cumulativa da equação 23 pode ser usada para calcular velocidade circular. Esse cálculo não é correto, já que o teorema de Newton sobre as cascas esféricas supõe distribuição esférica de massa, o que evidentemente não é válido para o disco. Mesmo assim, substituindo a equação 23 na equação 2, obtemos uma velocidade circular devida à massa do disco.

$$v^2(R) = \frac{G}{R} M_d \left[1 - \left(1 + \frac{R}{R_d} \right) e^{-R/R_d} \right] \quad (24)$$

Esse resultado é inexato, mas veremos a seguir que o erro não é muito grande.

O procedimento exato para obter a velocidade circular de um disco exponencial fino ultrapassa o escopo deste artigo, mas a solução pode ser consultada na referência [10] e está reproduzida a seguir:¹⁰

$$v^2(R) = 4\pi G \Sigma_0 R_d y^2 [I_0(y)K_0(y) - I_1(y)K_1(y)], \quad (25)$$

onde I_n e K_n são as funções de Bessel modificadas de primeiro e segundo tipo. Definiu-se a variável:

$$y \equiv \frac{R}{2R_d} \quad (26)$$

e a densidade central foi escrita como sendo:

$$\Sigma_0 = \frac{M_d}{2\pi R_d^2}, \quad (27)$$

Se a equação 25 é a solução exata, ela pode ser comparada com a aproximação que usou a massa cumulativa. A comparação está mostrada na Fig. 8. A aproximação subestima o pico de velocidade em quase 15%. Para raios maiores, a aproximação se assemelha ao valor exato. Embora seja conceitualmente incorreto substituir a massa cumulativa do disco por uma partícula na origem, na prática, essa aproximação vai ficando progressivamente menos errada conforme

¹⁰Equação 2.165 da referência [10]

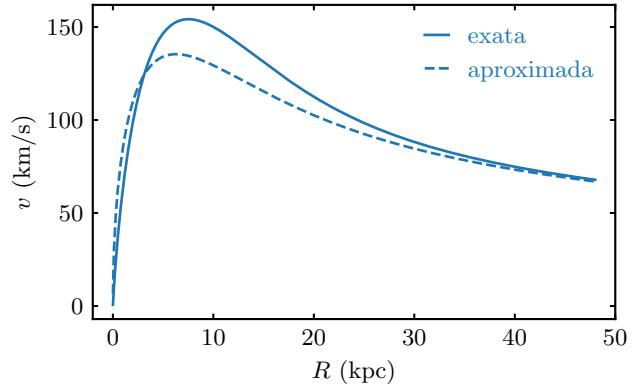


Figura 8: Comparação entre a solução exata para a velocidade circular de um disco exponencial fino [10] e a aproximação de massa cumulativa em esferas.

nos afastamos do centro. Isso é compreensível, tendo em mente que, para quem está a dezenas de kiloparsecs do centro, a exata geometria da região interna do disco já não é tão relevante. Visto de longe, tudo parece um ponto.

4.2 Disco de gás

Além de estrelas, há uma componente de gás no disco das galáxias espirais. Esse gás compõe o chamado meio interestelar. Em uma galáxia como a Via Láctea, o gás contribui com cerca de 10% da massa do disco.

Para representar o disco de gás, podemos adotar a mesma forma funcional da equação 19, apenas com outros parâmetros para o gás, que são sua massa M_g , seu comprimento de escala radial R_g , e seu comprimento de escala vertical z_g .

$$\rho(R, z) = \frac{M_g}{4\pi R_g^2 z_g} e^{-R/R_g} \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_g}\right) \quad (28)$$

Aplicando os mesmos procedimentos usados no disco estelar, teremos a velocidade circular devida à massa do gás.

4.3 Estrelas do bojo

No centro das galáxias espirais, há uma estrutura estelar esférica chamada de bojo. Pela sua simetria esférica, o bojo pode ser representado pelo próprio perfil de Hernquist, com parâmetros M_b e a_b :

$$\rho(r) = \frac{M_b}{2\pi} \frac{a_b}{r} \frac{1}{(r + a_b)^3}, \quad (29)$$

Tabela 1: Parâmetros usados no modelo composto.

M_h	$1 \times 10^{12} M_\odot$
a_h	44 kpc
M_d	$5 \times 10^{10} M_\odot$
R_d	3.5 kpc
M_g	$1 \times 10^9 M_\odot$
R_g	3.5 kpc
M_b	$1 \times 10^{10} M_\odot$
a_b	1 kpc

Aplicando os mesmos procedimentos usados no halo, teremos a velocidade circular devida à massa das estrelas do bojo.

4.4 Curva de rotação total

Finalmente, temos todos os ingredientes para compor a curva de rotação total, que inclui a contribuição das 4 componentes: halo, disco estelar, gás e bojo. A tabela 1 apresenta os parâmetros adotados para construir esse modelo composto. Tais parâmetros não visam reproduzir a estrutura da Via Láctea especificamente, mas são escolhas plausíveis para uma galáxia desse tipo.

Na curva de rotação total, não são as velocidades que se somam linearmente, mas sim as massas. Se pensarmos em termos das massas cumulativas, cada esfera de raio r contém a soma das massas das 4 componentes:

$$M_{\text{total}} = M_h + M_d + M_b + M_g \quad (30)$$

Como cada velocidade depende de $v \propto \sqrt{M}$, então as velocidades precisariam ser somadas quadraticamente:

$$v_{\text{total}}^2 = v_h^2 + v_d^2 + v_b^2 + v_g^2 \quad (31)$$

Para juntar todas as componentes, acabamos confundindo os raios cilíndricos R e os raios esféricos r . Já vimos que considerar massas dentro de esferas, mesmo quando o sistema não é esférico, gera erros toleráveis (ou, no mínimo, erros conhecidos). Do ponto de vista de modelagens teóricas, tende a ser natural pensar em raios esféricos. Ao fazer a conexão com o vocabulário observational das curvas de rotação, pode ser desejável se expressar em termos de raios cilíndricos, já que imagens observadas são bidimensionais.

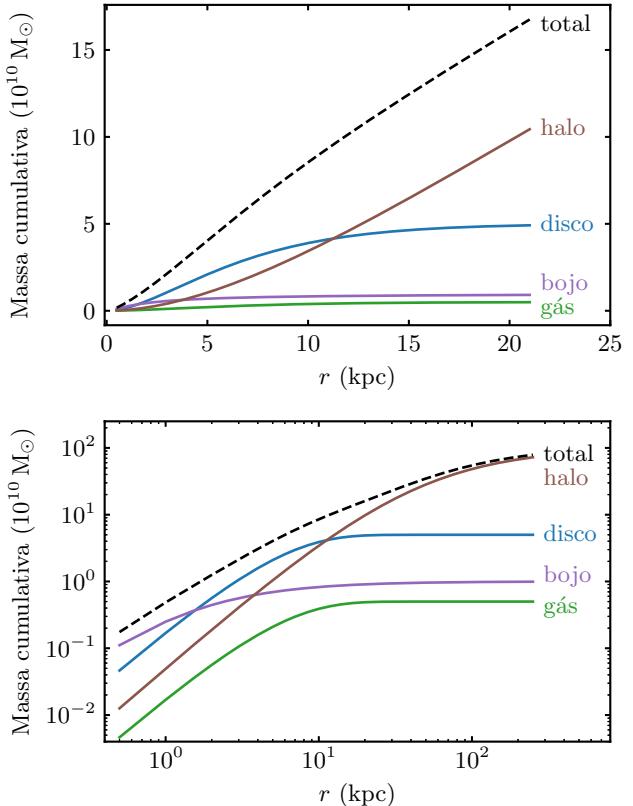


Figura 9: Massas cumulativas das diferentes componentes no modelo composto. O painel superior exibe a região central em escala linear. O painel inferior mostra as mesmas curvas em escala logarítmica e em outro intervalo radial.

Na Fig. 9 podemos avaliar as contribuições relativas em termos da massa cumulativa. O painel superior da Fig. 9 mostra a massa cumulativa em escala linear, enfatizando a região mais central. Aí podemos notar que a massa do disco está essencialmente toda contida dentro de ~ 15 kpc, pois por volta desse raio, a curva azul pára de crescer. Já a massa cumulativa do halo segue crescendo, de maneira aproximadamente linear nessa região. No painel inferior da Fig. 9, as mesmas massas cumulativas estão mostradas em escala logarítmica. Aí podemos inspecionar em mais detalhe os raios internos e externos. Vemos que o bojo está praticamente limitado a ~ 2 kpc. O gás é, por construção, paralelo ao disco, mas contribui menos por um fator fixo. Ironicamente, a massa do halo de matéria escura não é a predominante na região muito interna — para as escolhas de parâmetros deste modelo específico. Ou seja, embora a massa total de matéria escura seja muito maior que a soma da massa dos bárions,

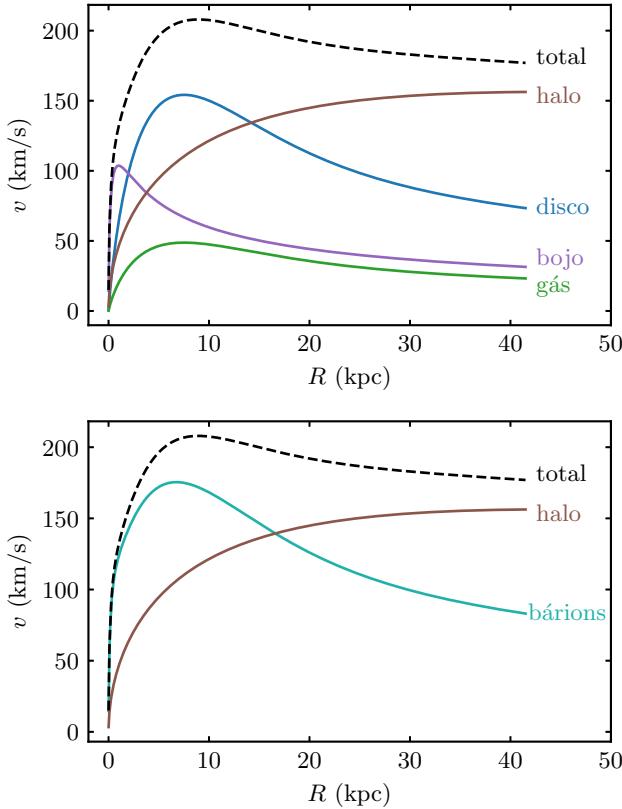


Figura 10: Curvas de rotação para o modelo composto. O painel superior mostra a contribuição de cada componente separadamente. No painel inferior, a contribuição dos bárions (gás e todas as estrelas) foi reunida numa única curva.

calha que na região bem interna da galáxia há mais bárions do que matéria escura. Isso ocorre porque os perfis de cada componente não têm as mesmas formas funcionais. Então a razão entre bárions e matéria escura não é constante em cada raio.

Por fim, a Fig. 10 mostra a culminação do nosso esforço em compreender exatamente como calcular a curva de rotação total de uma galáxia. O painel superior da Fig. 10 exibe a contribuição das 4 componentes separadamente. Aqui, cabe um esclarecimento sobre o conceito teórico de velocidade circular. As velocidades circulares mostradas separadamente não correspondem às velocidades que estrelas efetivamente têm. Ou seja, certamente não é o caso que as estrelas do disco giram com as velocidades azuis, e o gás gira com as velocidades verdes etc. Não. A velocidade circular corresponde à velocidade que uma partícula de teste precisaria ter para manter uma órbita circular, caso ela fosse colocada naquele raio.

Também é importante perceber o significado de analisar as curvas separadas em componentes. A curva azul significa a velocidade que uma partícula de teste teria, caso só existisse a massa do disco. A curva marrom significa a velocidade que uma partícula de teste teria, caso só existisse a massa do halo. E assim por diante. Ou seja, nenhuma dessas velocidades separadas efetivamente existe na galáxia. As curvas de velocidade circular são um recurso teórico que nos permite avaliar o papel desempenhado por cada componente. Ou seja, ao estudar a dinâmica dessa forma, podemos comparar as contribuições relativas de cada componente para a dinâmica global.

Já a curva de rotação total, essa sim, é a única com conexão mais direta com as observações. Os corpos reais (estrelas, gás) na galáxia estão efetivamente sujeitos a terem essa velocidade. Mesmo assim, cabe mais uma ressalva: cada estrela individual da galáxia não é obrigada a ter órbita exatamente circular. De fato, há uma grande variedade de órbitas complexas em potenciais galácticos. No entanto, a dinâmica global do disco realmente vem a ser a de um movimento de rotação como um todo, ao redor do centro. Afinal, é esse movimento ordenado, e não isotrópico, que caracteriza a morfologia de disco. Portanto, mesmo que haja certas componentes adicionais de velocidade (radial, tangencial e vertical), para a maior parte das estrelas em grandes raios, a velocidade tangencial de movimento circular será a predominante. Tomando o movimento médio de uma certa quantidade de estrelas ou de gás dentro de certos anéis, fica ainda mais bem caracterizado um movimento aproximadamente circular.

Tendo em mente qual deve ser o olhar para as velocidades circulares, percebemos na Fig. 10 que, para grandes raios, a dinâmica da galáxia de fato é dominada pela contribuição da massa de matéria escura.

No painel inferior da Fig. 10, a contribuição dos bárions (o gás e todas as estrelas) foi reunida numa única curva. Curiosamente, a curva de rotação devida à massa dos bárions vem a ser dominante na região mais interna — para os parâmetros do nosso exemplo. Isso não significa que o halo de matéria escura seja irrelevante ali: ele existe e contribui, apenas não é dele a contribuição dominante naquela região.

5 Conclusão

Apresentou-se uma explicação introdutória de como curvas de rotação planas implicam na existência de halos de matéria escura em galáxias. Pudemos entender que, além de existir, o halo de matéria escura precisa ter um perfil de densidade apropriado, para explicar as velocidades observadas. Estudando os detalhes dos perfis de densidade comumente adotados, pudemos construir um modelo que coloca o halo de matéria escura no contexto das demais componentes (dico estelar, gás e estrelas do bojo).

Agradecimentos

O autor agradece o apoio do CNPq (307205/2021-5) e da Fundação Araucária.

Sobre o autor

Rubens Eduardo Garcia Machado (rubensmachado@utfpr.edu.br) é professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), em Curitiba, onde atua no Programa de Pós-graduação em Física e Astronomia. É bolsista de produtividade do CNPq. Fez bacharelado em Física e mestrado em Astronomia na USP. Fez doutorado pela USP e pela Université de Provence, na França. Passou por pós-doutorados na USP e no Chile. Tem experiência na área de simulações computacionais de galáxias e de aglomerados de galáxias.

Referências

- [1] F. Zwicky, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, Helvetica Physica Acta **6**, 110 (1933). Disponível em <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1933AcHPh...6..110Z>, acesso em 22/01/2024.
- [2] A. Bosma, *Rotation curves and the dark matter problem*, in *Connaitre le Cosmos. Enjeux philosophiques et scientifiques*, editado por S. Beyne e J. Bernard (Spartacus-IDH, 2023), Nouvelle Vision des Sciences, no prelo. [ArXiv:2309.06390](https://arxiv.org/abs/2309.06390).
- [3] D. C. Rodrigues e A. Hernández-Arboleda, *Rotação de galáxias e matéria escura*, *Cadernos de Astronomia* **2**(1), 6 (2021).
- [4] L. Hernquist, *An Analytical Model for Spherical Galaxies and Bulges*, *ApJ* **356**, 359 (1990).
- [5] J. Bovy, *Dynamics and Astrophysics of Galaxies* (Princeton University Press, Princeton, 2023), no prelo. Disponível em <https://galaxiesbook.org/>, acesso em jan. 2024.
- [6] J. F. Navarro, C. S. Frenk e S. D. M. White, *A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering*, *ApJ* **490**(2), 493 (1997). [ArXiv:astro-ph/9611107](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9611107).
- [7] M. Vogelsberger et al., *Cosmological simulations of galaxy formation*, *Nature Reviews Physics* **2**(1), 42 (2020). [ArXiv:1909.07976](https://arxiv.org/abs/1909.07976).
- [8] A. R. Duffy et al., *Dark matter halo concentrations in the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe year 5 cosmology*, *MNRAS* **390**(1), L64 (2008). [ArXiv:0804.2486](https://arxiv.org/abs/0804.2486).
- [9] G. B. Lima Neto, *Astronomia extragalática e cosmologia*, Notas de aula [on-line] (2022). Disponível em <http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Extragal.html>, acesso em jan. 2024.
- [10] J. Binney e S. Tremaine, *Galactic Dynamics* (Princeton University Press, Princeton, 2008), 2^a ed.

Núcleos ativos de galáxias: uma breve introdução

Dinalva A. Sales

Universidade Federal do Rio Grande

Resumo

Núcleos ativos de galáxia (AGN) são caracterizadas pela presença de buracos-negros supermassivos (SMBHs) em seus núcleos, os quais estão envolvidos na aquisição de matéria por meio de um disco de acreção. No paradigma dos AGNs, persiste um debate significativo quanto à origem dessa atividade, abrangendo desde os mecanismos desencadeadores até os impactos sobre a poeira e as moléculas nas galáxias hospedeiras. Este trabalho busca descrever as principais características observacionais da classificação e unificação sobre núcleo ativos de galáxias.

Abstract

Active Galactic Nuclei (AGN) are characterized by the presence of supermassive black holes (SMBHs) at their cores, which are involved in the acquisition of matter through an accretion disk. Within the AGN paradigm, a significant debate persists regarding the origin of this activity, encompassing triggering mechanisms and the impacts on dust and molecules in host galaxies. This work aims to describe the main observational characteristics of the classification and unification of active galactic nuclei.

Palavras-chave: núcleos ativos de galáxias, galáxias ativas, galáxias Seyferts

Keywords: active galactic nuclei, active galaxies, Seyfert galaxies

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43653](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43653)

1 Introdução

A busca por classificação parece surgir como uma abordagem para decifrar a complexidade de fenômenos multifacetados observado pela humanidade, tais como os núcleos ativos de galáxias (AGNs). Frequentemente, classificar e categorizar representam os primeiros passos empreendidos em uma investigação científica, antecedendo e, de fato, impulsionando a compreensão das causas físicas subjacentes aos fenômenos observados na natureza.

A narrativa científica está repleta de exemplos nos quais a classificação figura como o ponto de partida crucial na jornada rumo à compreensão. Um clássico exemplo de sucesso da abordagem de classificação em astronomia importante ser mencionado é a classificação espectral estelar, onde, é possível ver primeiros estudos desde final do século XIX em Harvard que permitiram a Payne-Gaposkin evidenciar que a sequência de classificação espectral de Harvard representa uma ordenação de temperatura na fotosfera, enquanto as abundâncias dos elementos mais comuns exibem mínima variação ao longo da sequência principal.

Essa contribuição, por sua vez, desempenhou um papel fundamental na concepção do diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) que é utilizado atualmente para estudar a estrutura e evolução estelar [1–3].

Sob vários prismas, os AGNs se revelam como fenômenos mais complexos em comparação com galáxias compostas apenas por estrelas (emissão térmica), também conhecidas como galáxias normais ou galáxias com alta taxa de formação estelar jovem (*starburst*). Enquanto estas últimas emitem predominantemente sua luz na faixa óptica atmosférica, os AGNs irradiam intensamente em todo comprimento de onda do espectro eletrromagnético acessível. Essa característica dos AGNs faz com que suas descobertas e classificações foram acontecendo ao longo da evolução tecnológica dos sensores e telescópios. Neste ponto, para leitores que objetiva ter um aprofundamento maior sobre essa classe de galáxia é recomendável ler nos seguintes livros e artigos [1,4–11].

2 Definição e classificação

À medida que as descobertas progredem com ao longo dos avanços instrumentais, juntamente com as detecções em diferentes comprimentos de ondas, a classificação dos AGNs é complexa e as assinaturas geométricas desses objetos são acessados empregando muitos métodos diferentes. Embora isso possa parecer um pouco difícil de compreender, um aprofundamento substancial pode ser adquirida ao correlacionar as diversas classificações e propriedades de fontes individuais.

De modo geral, é sabido que AGNs são uma das classes de objetos mais energéticos do Universo e podem emitir, em comprimento de onda do óptico, cerca de $\sim 10^{48}$ erg/s (100 a 1000 vezes o brilho total da Via Láctea). Isso evidencia que eles podem ser aproximadamente $\sim 10^{10}$ vezes mais energéticos do que as galáxias convencionais, contudo, o volume que irradia essa energia é cerca de $\sim 10^{30}$ vezes menor que o volume da galáxia hospedeira.

O núcleo dessas galáxias emite energia que não pode ser explicada como sendo gerada unicamente por estrelas. Dentro do paradigma atual, a energia emitida por um AGN é gerada à partir da transformação da energia potencial gravitacional de matéria que é acretada à um Buraco Negro Supermassivo (SMBH), com massa que varia de um milhão a um bilhão de massas solares, através de um Disco de Acreção.

Neste contexto, o estudo de AGNs é um dos temas fundamentais na busca da melhor compreensão sobre formação e evolução de galáxias, e consequentemente, tal compreensão auxilia no melhor conhecimento sobre a própria evolução do Universo. Mesmo existindo muitos avanços na compreensão sobre AGNs ainda existem perguntas fundamentais que ainda estão em aberto, são elas:

- o que o fenômeno SMBH causa no material (estrelas, gás, poeira e moléculas) que compõe suas galáxias;
- quais as propriedades físicas que as galáxias necessitam para ativar seu buraco negro central?
- qual a importância fundamental que o SMBH possui em promover a estabilidade de suas galáxias?

Muito autores tem dedicados décadas na busca de respostas a essas perguntas e conclusões mais profunda podem ser visto nos seguintes trabalhos [1, 4–21].

Uma das principais características que separam os diferentes tipos de AGNs são galáxias que possuem emissão intensa em comprimentos de onda de rádio (*loud*) e galáxias com fraca ou sem emissão de rádio (*quiet*). A tabela 1 mostra um panorama geral das diferentes classificações e tipos de AGNs.

O primeiro estudo documentação do espectro óptico de um Núcleo Ativo de Galáxia (AGN) foi documentada por [22], ao observar as proeminentes linhas de emissão no espectro nuclear de NGC1068. Entretanto, o exame das regiões nucleares de seis galáxias espirais atípicas realizado por Carls Seyfert (1943) marca o pioneirismo no primeiro estudo sistemático de uma classe de AGN. Ao analisar os espectros ópticos das galáxias NGC 1068, NGC 1275, NGC 3516, NGC 4051, NGC 4151 e NGC 7469, Seyfert observou que todas apresentavam linhas de excitação média, como [O III] 5007Å, além de linhas permitidas de H_I, HeI e HeII com amplas larguras (FWHM > 1000 km s⁻¹).

Após essa investigação, [23] classificou as galáxias Seyfert em duas categorias. Essa categorização é determinada pela presença ou ausência da componente larga nas linhas de emissão permitidas na faixa de comprimento de onda óptico [24]:

- *Seyfert 1* - Nessas galáxias, observam-se duas componentes nas linhas de emissão. Uma delas apresenta larguras semelhantes às observadas em galáxias normais ou com formação estelar (aproximadamente 500 km s⁻¹) e origina-se em um gás ionizado de baixa densidade eletrônica (10^3 – 10^6 cm⁻³). A outra componente surge apenas em linhas permitidas, como H_I, HeI e HeII, exibindo larguras de cerca de 5000 km s⁻¹, indicando que essas linhas têm origem em um gás de alta densidade, superior a 10^9 cm⁻³. Uma característica adicional das Seyfert 1 é que o contínuo observado segue uma lei de potência.
- *Seyfert 2* - Nessas galáxias, as linhas de emissão, tanto permitidas quanto proibidas, exibem perfis e larguras semelhantes, raramente ultrapassando uma velocidade de ~ 600 km s⁻¹. No

Tabela 1: Principais classificações e tipos de AGNs.

Rádio fraco, <i>quiet</i>	Rádio intenso, <i>loud</i>	Tipos
Quasar rádio fraco (RQQ)	Quasar rádio intenso (RLQ)	AGNs tipo 1
Seyfert 1	Galáxia rádio com linhas largas (BLRG)	
Seyfert 2	Galáxia rádio com linhas largas (NLRG)	AGNs tipo 2
LINER	Galáxia rádio com linhas largas (NLRG)	AGNs tipo 3

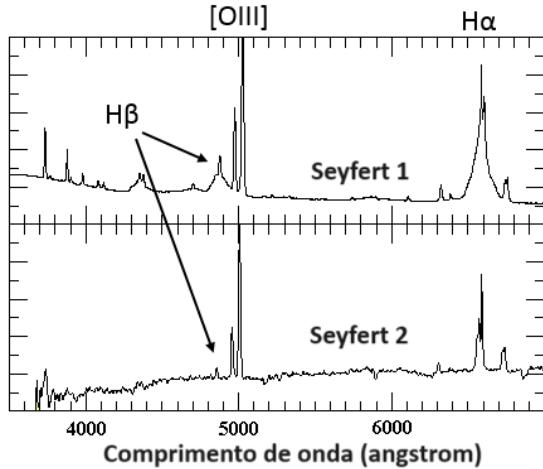


Figura 1: Um exemplo de espectros de Seyfert 1 e Seyfert 2 destacando suas diferenças. As linhas largas de $H\beta$ e $H\alpha$ estão presentes apenas em Seyferts do tipo 1. A linha de emissão [OIII] forte é estreita em ambos os casos. O fluxo está em unidades arbitrárias e o comprimento de onda está em unidade de angstroms. Figura adaptada de [25].

entanto, em contraste com as Seyfert 1, o espetro de energia contínua das galáxias Seyfert 2 pode ser descrito como uma combinação de uma componente estelar e uma lei de potência.

A Figura 1 mostra o espetro em comprimento de onda óptico de AGNs Seyfert 1 e 2. É possível claramente a diferença nas linhas de emissão onde as linhas de recombinação do hidrogênio ($H\beta$ e $H\alpha$) em Seyfert 1 estão alargadas enquanto essas mesmas linhas de recombinação são estreitas em Seyfert 2.

As principais categorias de AGNs compreendem as galáxias Seyfert e os quasares, distinguindo-se pela quantidade de energia irradiada pela fonte central. Nas galáxias Seyfert, a luminosidade do núcleo na faixa de comprimentos de onda visível é comparável à energia emitida pela galáxia hospedeira. Por outro lado, nos quasares, a fonte nuclear é aproximadamente cem vezes mais intensa do que a luminosidade da galáxia

hospedeira [5, 8]. Os estudos sobre AGNs receberam uma notável atenção no início da década de 1960, impulsionada pela descoberta de quasares, que se destacavam por suas elevadas luminosidades, aparência quase estrelar e espectros ópticos semelhantes aos das galáxias Seyfert 1 [26, 27].

Opostos aos Quasares, AGNs mais luminosos, existem AGNs que possuem linhas de emissão iônica estreitas apenas de baixa ionização, também conhecidos como LINERS [28]. Entretanto, ainda é bem discutido e permanece incerto se LINERS são AGNs ou galáxias com formação estelar no núcleo das galáxias [8].

A criação de sistemas de classificação para AGNs com intensa emissão em comprimentos de onda de rádio (*loud*) ocorreu, em muitos aspectos, de maneira paralela àquela dos AGN identificados primeiramente com dados ópticos. Estudos ópticos das galáxias com rádio intenso mostraram que elas tinham características espectrais semelhantes aquelas classes de AGNs tipo 1, 2 e 3. A tabela 1 mostra as classes similares em emissão ópticas sendo uma parte com emissão de rádio fraco (*quiet*) e intenso (*loud*).

À medida que a sensibilidade dos instrumentos melhora e novas técnicas são desenvolvidas, as classificações podem parecer ambígua. Isso é especialmente notável na distinção entre Seyfert 1 e Seyfert 2, assim como, BLRG ou NLRG. Quando os espetros abrangem apenas a parte azul da janela óptica (ou seja, cobrindo a região espectral das linhas $H\alpha$ e $H\beta$), pode ser desafiador detectar linhas largas permitidas, especialmente se a componente AGN da linha larga for tênue em comparação com o continuum estelar da galáxia hospedeira e/ou se a relação sinal-ruído (S/N) for baixa e/ou a resolução espacial das observações também forem baixas. Em determinadas situações, é necessário empregar espetros de alta relação S/N, que cubram a forte linha $H\alpha$, combinados com modelagem e subtração precisas do contínuo

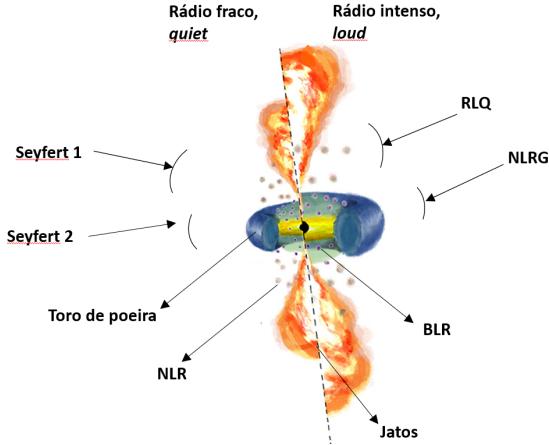


Figura 2: Modelo unificado de AGNs identificando as classificações dos diferentes tipos de AGNs e suas linhas de visadas. A legenda mostra as localizações e geometrias do disco de acreção, região de linhas largas (BLR), região de linhas estreitas (NLR), toro de poeira e jatos. Os ângulos de visada dos AGNs tipo Seyfert 1, Seyfert 2, RLQ e NLRG também são mostrados. Figura adaptada de [29].

estelar, para revelar o verdadeiro caráter Seyferts 1 de um AGN.

Embora possa parecer complexo, uma compreensão substancial pode ser alcançada ao correlacionar as diversas classificações e propriedades de fontes individuais em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, assim, a classificação pode ser mais robusta [30]. Essa seção sobre classificação de AGNs não abordou as classes de galáxias com variabilidade na emissão em rádio e também os AGNs com jatos em rádio.

3 Modelo unificado de AGNs

A motivação para a proposição do modelo unificado de AGNs surgiu da necessidade de explicar as diversas características espectrais e morfológicas dos dados observados em diferentes comprimentos de onda nesses objetos. Antes da concepção dessa unificação, muitos desafios eram encontrado na interpretação das propriedades observadas entre diferentes subclasses de AGNs, como as galáxias Seyfert 1 e Seyfert 2, além de outras classes como quasares e rádio galáxias.

Nesse sentido, o modelo unificado de AGNs propõe a existência de um núcleo central contendo um SMBH, um disco de acreção e regiões de gás ionizado como mostrado da Figura 2. A orientação do observador em relação a essas es-

truturas determina as características observadas, como a presença de linhas largas (BLR) permitidas e linhas estreitas (NLR), a emissão de rádio, e outros aspectos do espectro eletromagnético [12].

A proposição do modelo unificado de AGNs por [12] prevê a presença de um SMBH no centro da galáxia, cercado por pelo disco de acreção. Nesse modelo, as linhas largas são geradas pelas nuvens de gás próximas ao núcleo, na chamada região de linhas largas (BLR), enquanto as linhas estreitas são produzidas por nuvens de gás localizadas nas regiões mais externas da galáxia, aproximadamente 1 kiloparsec de distância, na região de linhas estreitas (NLR). Portanto, quando observamos a luz proveniente da BLR e da NLR, identificamos uma galáxia Seyfert 1. Este modelo também propõe que Seyfert tipo 1 e 2 são os mesmos objetos, porém, uma estrutura toroidal composta por poeira obscurece as BLR, assim identificamos uma galáxia Seyfert 2 [4, 12].

Esse modelo unificado busca explicar a variedade de observações em AGNs de forma consistente e dependente da orientação do observador em relação à estrutura intrínseca da galáxia ativa.

O modelo unificado de AGNs também propõe a existência de um meio difusor, posicionado acima do toro de poeira, que dispersa a luz proveniente da BLR e pode ser visto pelo observador quando a galáxia é classificada como Seyfert 2 [31]. Essa proposição foi confirmada por observationalmente por [12], que identificaram linhas permitidas largas no espectro polarizado da galáxia Seyfert 2 NGC 1068.

Dada a diversidade observada na população geral de AGN e suas galáxias hospedeiras, é improvável que tal unificação perfeita possa se manter e ainda se mantém muitas perguntas fundamentais sobre classificação e natureza dos AGNs. O modelo unificado de AGNs, centrados na orientação do observador, demonstra notável êxito na explicação de algumas propriedades observadas nos AGNs, especialmente na relação entre AGN de linhas largas e estreitas. Ao longo das últimas duas décadas, esses esquemas resistiram à maioria dos principais testes estatísticos. No entanto, é evidente que representam uma generalização, uma tentativa de simplificar, possivelmente simplificando excessivamente, uma situação intrinsecamente complexa.

A principal utilidade do modelo de unificação

reside no fato de possibilitarem uma melhor compreensão da física fundamental de formação e evolução dos AGN. Simultaneamente, o estudo desenvolvidos para validar a unificação proporcionou informações significativas sobre a distribuição e evolução do meio interestelar nas regiões centrais dos núcleos de AGNs. Como resultado, é possível compreender os AGN como sistemas dinâmicos e em evolução, que exercem um impacto substancial em seu entorno. Porém, é válido ressaltar novamente que este trabalho está mostrando apenas alguns pontos principais de um complexo estudo de AGNs, assim, uma maior compreensão sobre o tema pode ser aprofundado através de estudos das referências bibliográficas apresentadas neste trabalho (ver seção Referências).

4 Agradecimentos

Dinalva A. Sales agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

Sobre o autor

Dinalva Aires de Sales (dinalvaires@gmail.com) é graduada em Matemática pela Universidade do Vale do Paraíba (2005), Mestre em Física e Astronomia pela Universidade do Vale do Paraíba (2007) e Doutora em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2012). Foi NASA Postdoctoral Fellow no Rochester Institute of Technology (2012/2013) e pós-doutoranda da DOCFIX-FAPERGS/CAPES na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2013/2016).

Possui experiência na área de Astrofísica, atuando principalmente nos seguintes temas: núcleo ativo de galáxia, galáxias em interação, moléculas complexas, espectroscopia e imageamento. Atualmente é professora adjunta do Instituto de Matemática, Estatística e Física (IMEF) da Universidade Federal do Rio Grande (IMEF-FURG), foi Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Física (PPG-Física) do IMEF-FURG (2019-2021) e atualmente Coordenadora de Bolsas Institucionais da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) da FURG.

Referências

- [1] C. Tadhunter, *An introduction to active galactic nuclei: classification and unification*, *New Astronomy Reviews* **52**(6), 227 (2008).
- [2] E. D. d. Santos et al., *O caminho tortuoso de mulheres na ciência e na astronomia: evolução e composição estelar a partir de estudos feitos por Cecilia Payne*, *Revista Vitruvian Cogitationes* **4**(extra), 246 (2023).
- [3] P. C. Vieira, N. T. Massoni e A. Alves-Brito, *O papel de Cecilia Payne na determinação da composição estelar*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43** (2021).
- [4] R. Antonucci, *Unified models for active galactic nuclei and quasars.*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **31**(1), 473 (1993).
- [5] B. M. Peterson, *An introduction to active galactic nuclei* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- [6] J. H. Krolik, *Active galactic nuclei: from the central black hole to the galactic environment* (Princeton University Press, Princeton, 1998).
- [7] D. E. Osterbrock e G. J. Ferland, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (University Science Books, Melville, 2006).
- [8] L. C. Ho, *Nuclear activity in nearby galaxies.*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **46**, 475 (2008). [ArXiv:0803.2268](https://arxiv.org/abs/0803.2268).
- [9] H. Netzer, *Revisiting the unified model of active galactic nuclei*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **53**(1), 365 (2015).
- [10] T. M. Heckman e P. N. Best, *The coevolution of galaxies and supermassive black holes: insights from surveys of the contemporary universe*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **52**, 589 (2014).
- [11] W. N. Brandt e D. M. Alexander, *Supermassive black-hole growth over cosmic time:*

- Active galaxy demography, physics, and ecology from Chandra surveys*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **107**(16), 7184 (2010).
- [12] R. R. J. Antonucci e J. S. Miller, *Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068*, *The Astrophysical Journal* **297**, 621 (1985).
- [13] R. Terlevich e J. Melnick, *Warmers: the missing link between starburst and Seyfert galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **213**(4), 841 (1985).
- [14] A. Alonso-Herrero et al., *Nuclear 11.3 μm PAH emission in local active galactic nuclei*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **443**(3), 2766 (2014).
- [15] A. Alonso-Herrero et al., *A mid-infrared spectroscopic atlas of local active galactic nuclei on sub-arcsecond resolution using GTC/CanariCam*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **455**(1), 563 (2016).
- [16] C. M. Canelo et al., *Profile comparison of the 6-9 μm polycyclic aromatic hydrocarbon bands in starburst-dominated galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **507**(4), 6177 (2021).
- [17] C. M. Canelo et al., *Variations in the 6.2 μm emission profile in starburst-dominated galaxies: a signature of polycyclic aromatic nitrogen heterocycles (PANHs)?*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **475**, 3746 (2018).
- [18] C. M. Canelo, *O mundo aromático - dos PAHs no meio interestelar às condições bióticas*, Dissertação de Mestrado, IAG, São Paulo (2016).
- [19] M. G. Pastoriza, *Studies of galaxies with peculiar nuclei*, *Astrophysics and Space Science* **33**(1), 173 (1975).
- [20] R. A. Riffel et al., *Mapping of molecular gas inflow towards the Seyfert nucleus of NGC 4051 using Gemini NIFS*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **385**(3), 1129 (2008).
- [21] R. Riffel, A. Rodriguez-Ardila e M. G. Pastoriza, *A 0.8-2.4 μm spectral atlas of active galactic nuclei*, *Astronomy & Astrophysics* **457**(1), 61 (2006).
- [22] E. A. Fath, *The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters*, *Lick Observatory Bulletins* **5**(149), 71 (1909).
- [23] E. Y. Khachikian e D. W. Weedman, *An atlas of Seyfert galaxies*, *ApJ* **192**, 581 (1974).
- [24] D. E. Osterbrock, *Observational model of the ionized gas in Seyfert and radio-galaxy nuclei*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **75**(2), 540 (1978).
- [25] J. Runco, *Frequency of Seyfert type transitions in a sample of 102 local active galactic nuclei*, Trabalho de Conclusão de Curso, California Polytechnic State University (2015). Disponível em <https://digitalcommons.calpoly.edu/physsp/128/>, acesso em fev. 2024.
- [26] M. Schmidt, *3C 273: a star-like object with large redshift*, *Nature* **197**, 1040 (1963).
- [27] J. L. Greenstein, *Redshift of the unusual radio source: 3C 48*, *Nature* **197**, 1041 (1963).
- [28] T. M. Heckman, *An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - activity in the normal galactic nuclei*, *Astronomy & Astrophysics* **87**, 152 (1980).
- [29] M. Berton et al., *An orientation-based unification of young jetted AGN: the case of 3C 286*, *Frontiers in Astronomy Space Sciences* **4** (2017).
- [30] D. A. Sales et al., *An embedded active nucleus in the OH Megamaser Galaxy IRAS16399-0937*, *The Astrophysical Journal* **799**(1), 25 (2015).
- [31] R. D. Blandford e M. J. Rees, *Some comments on radiation mechanisms in Lacertids*, in *Pittsburgh Conference on BL Lac Objects, Proceedings*, editado por A. M. Wolfe (1978), 328–341.

Galáxias anãs de brilho ultrabaixo

Rainer Karl Madejsky

Universidade Estadual de Feira de Santana

Resumo

A primeira galáxia anã de brilho ultrabaixo UFD (*ultra-faint dwarf*) foi descoberta no levantamento SDSS (Sloan Digital Sky Survey) em 2005, iniciando uma busca que resultou na descoberta de dezenas de galáxias anãs similares. Trata-se de uma continuação das galáxias anãs clássicas conhecidas antes do levantamento SDSS em direção a luminosidades e metalicidades mais baixas. O estudo da cinemática estelar mostra que as galáxias UFD possuem mais matéria escura que as galáxias anãs clássicas. As observações espectroscópicas revelam que as estrelas nas galáxias UFD são entre as mais velhas conhecidas e as de mais baixa metalicidade. As abundâncias de ferro Fe e de outros elementos químicos mostram grandes variações em consequência de formação estelar extensa no passado. A análise de estrelas individuais nas galáxias UFD em um intervalo estreito de massa estelar é consistente com a hipótese de que se formaram muitas estrelas de alta massa nas galáxias UFD e que o processo de formação estelar terminou na época de reionização do universo no *redshift* $z \sim 6$. Uma vez que as galáxias anãs de brilho ultrabaixo UFD são os sistemas estelares mais velhos e os mais escuros conhecidos no universo, as mesmas são excelentes laboratórios para estudar a formação das primeiras galáxias no universo bem como o comportamento de matéria escura em pequena escala.

Abstract

The first ultra-faint dwarf galaxy UFD was discovered in the Sloan Digital Sky Survey SDSS in 2005, beginning a search that led to the discovery of several tens of similar dwarf galaxies. They are a continuation of the classical dwarf spheroidal galaxies known before SDSS towards lower luminosities and lower metallicities. The study of stellar kinematics revealed that UFD galaxies have more dark matter than the classical dwarf galaxies. Spectroscopic observations show that the stars within UFD galaxies are among the oldest and most metal-poor stars known. The abundances of iron Fe and other chemical elements show large spread due to extended star formation in the past. The analysis of individual stars in UFD galaxies in a small stellar mass interval is consistent with the hypothesis that large numbers of massive stars were formed in UFD galaxies and that the process of star formation ended at the epoch of reionization of the universe at redshift $z \sim 6$. Once the UFD galaxies are the oldest and most dark matter-dominated known stellar systems, they are excellent laboratories to study formation of the first galaxies in the universe as well as the behaviour of dark matter on small scales.

Palavras-chave: galáxias anãs, cinemática, matéria escura, metalicidade, formação de estrelas.

Keywords: dwarf galaxies, kinematics, dark matter, metallicity, star formation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43864](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43864)

1 A descoberta das galáxias

A existência de galáxias além dos limites da Via Láctea foi comprovada há exatamente um século. A descoberta do método de medir distâncias astronômicas muito grandes pela astrônoma Miss Leavitt marcou o passo fundamental para entender a natureza do universo em grande escala. Antes de sua descoberta da relação entre período e luminosidade para as estrelas variáveis Cefeidas, as distâncias astronômicas foram determinadas pelo método da paralaxe e triangulação

que alcançava na época distâncias de poucas centenas de anos-luz. O novo método permitiu a ela determinar, em 1912, uma distância de 200 mil anos-luz para a pequena nuvem de Magalhães, SMC (*Small Magellanic Cloud*), galáxia satélite da Via Láctea. O método foi desenvolvido por Miss Leavitt analisando placas fotográficas. Talvez ela teria sido a primeira pessoa a descobrir as enormes distâncias de numerosas galáxias no Grupo Local e além, mas no início do século XX, mulheres não tinham permissão de coordenar projetos de pesquisa e operar telescópios de grande

porte.

Em 1923, E. Hubble, astrônomo observador, usou o método período-luminosidade desenvolvido por Miss Leavitt e conseguiu determinar a distância de Andrômeda M 31, obtendo um valor em torno de 2 milhões de anos-luz, comprovando que se trata de um sistema estelar muito além dos limites da Via Láctea. Ele apresentou as observações realizadas no observatório do Mount Wilson em um trabalho denominado *Cefeidas em nebulosas espirais* (título original, *Cepheids in Spiral Nebulae*) em 1924 à Sociedade Americana de Astronomia (AAS). Poucos anos depois ele descobriu a expansão entre as galáxias o que hoje é um dos aspectos relevantes do modelo cosmológico padrão MCP.

Também é devido a E. Hubble a classificação das galáxias em galáxias espirais, elípticas e irregulares na chamada Sequência de Hubble. A classificação é feita de acordo com as características morfológicas das galáxias. Inicialmente acreditava-se que se trata de uma sequência de evolução, chamando as galáxias elípticas de galáxias tipo cedo (*early type galaxies*) e as galáxias espirais de tipo tardio (*late type galaxies*). Hoje sabemos que não se trata de uma sequência evolutiva, no entanto, há indícios de que galáxias espirais em colisão e posterior fusão podem resultar na formação de uma galáxia que aparece com um perfil de luminosidade típico de uma galáxia elíptica. Além das galáxias elípticas e espirais há uma classe de galáxias irregulares as quais mostram uma morfologia menos simétrica. No universo local, aproximadamente um terço das galáxias são irregulares.

1.1 Galáxias regulares

As galáxias que mostram uma morfologia regular são as galáxias espirais e as galáxias elípticas.

Observacionalmente, as galáxias espirais se destacam pelo alto brilho superficial central e, a depender dos filtros usados, nos braços espirais onde ocorre a formação de estrelas. As galáxias espirais em geral são galáxias grandes com massas da ordem de $10^9 M_{\odot}$ a $10^{12} M_{\odot}$, possuem altas velocidades rotacionais e grandes quantidades de gás e poeira que permitem a formação de estrelas até hoje [1]. As curvas de rotação das galáxias espirais observadas a partir dos anos 1980 mostra-

ram que deve existir matéria escura em grandes quantidades em torno das galáxias espirais. Uma explicação alternativa para as curvas de rotação que são quase constantes em grandes distâncias em relação ao centro da galáxia, seria uma modificação da lei da gravitação chamada MOND (*modified Newtonian dynamics*). Historicamente, a lei da gravitação foi deduzida a partir das leis de Kepler dos planetas do Sistema Solar, abrangendo distâncias menores que um milésimo de um parsec, enquanto as curvas de rotação das galáxias espirais abrangem distâncias de até 100 kpc.

As galáxias elípticas mostram uma distribuição em massa muito mais larga do que as galáxias espirais. As galáxias elípticas mais massivas, as chamadas galáxias cD, possuem massas acima de $10^{13} M_{\odot}$, portanto, são as galáxias mais massivas conhecidas no universo. As galáxias cD se encontram sempre nos exatos centros dinâmicos de aglomerados de galáxias, mas não todo aglomerado de galáxias possui uma galáxia cD. As observações e simulações numéricas indicam que as galáxias cD crescem ao longo do tempo pela fusão com outras galáxias do aglomerado.

As galáxias elípticas normais possuem massas luminosas semelhantes que as galáxias espirais. As galáxias elípticas em geral não mostram rotação regular e o método de determinar as massas que é usado nas galáxias espirais não pode ser aplicado. Como alternativa, pode ser aplicado o teorema virial sobre a dispersão de velocidades observada, para determinar a massa até a borda luminosa de uma galáxia elíptica. As galáxias elípticas não possuem gás e, portanto, hoje não pode ocorrer formação de estrelas. As estrelas de uma galáxia elíptica se formaram simultaneamente com a protogaláxia e são estrelas velhas e coevas. Os espectros de galáxias elípticas normais mostram grande contribuição de estrelas de tipo espectral K0 III.

Dentro dos aglomerados de galáxias há um gradiente radial entre galáxias elípticas e espirais. As galáxias elípticas em geral se encontram nas regiões centrais dos aglomerados enquanto que as galáxias espirais são encontradas mais distantes do centro do aglomerado. Acredita-se que o gradiente morfológico é resultado tanto do processo de formação das galáxias quanto de interações fortes e colisões entre as galáxias do aglomerado.

Uma das ideias mais simples sobre a formação

das galáxias é o colapso monolítico de uma protogaláxia [2]. Como as galáxias elípticas hoje se encontram em regiões mais densas, a hipótese básica é que as protogaláxias elípticas se formaram a partir de flutuações de densidade com amplitude maior que as protogaláxias espirais. Quanto maior é a densidade inicial da nuvem protogaláctica, tanto mais curto torna-se o tempo de colapso gravitacional e o tempo de converter o gás da nuvem em estrelas é muito mais curto ainda. Em consequência, nas protogaláxias elípticas o colapso é mais rápido do que nas protogaláxias espirais, e a formação de estrelas é tão eficiente que não sobra nem gás nem poeira ao final do colapso. A galáxia elíptica final adquire rapidamente um novo equilíbrio dinâmico com todo gás e poeira tendo se transformado em estrelas as quais possuem a mesma idade.

A densidade mais baixa das protogaláxias espirais resulta em um colapso mais lento e a formação de estrelas é muito menos eficiente. No final do colapso sobra uma grande parte de gás e poeira que forma um disco fino por dissipação. O colapso lento e o raio grande da protogaláxia espiral permitem transferência de momento angular com as galáxias vizinhas, resultando nas altas velocidades rotacionais observadas. A transferência de momento angular de acordo com esse mecanismo sendo chamado de torque de maré (*tidal torque mechanism*) foi verificado em simulações e mostra de forma consistente a origem do alto momento angular das galáxias espirais.

O cenário do colapso monolítico explica de uma forma muito simplificada a formação das galáxias e algumas das suas características mais salientes. No entanto, observações recentes indicam que a formação das galáxias é um processo longo de agregação de galáxias menores que continua até hoje e pode modificar constantemente as características observáveis da galáxia final. Nesse cenário atual, as galáxias anãs desempenham um papel fundamental.

1.2 Galáxias anãs

As galáxias elípticas anãs são as galáxias mais comuns em número no universo local, contudo, a sua contribuição para a massa luminosa é pequena. As galáxias elípticas anãs mais famosas são as galáxias satélites de Andromeda M 31, mas

Tabela 1: Galáxias anãs em torno da Via Láctea conhecidas antes de 2005.

Nome	Ano	D[kpc]	R[pc]	M _V
LMC		52	4300	-18,1
SMC		60	5800	-16,1
Sculptor	1937	86	280	-10,9
Fornax	1938	138	800	-13,3
Leo I	1950	250	270	-11,8
Leo II	1950	230	170	-9,7
Ursa Minor	1954	75	400	-9,0
Draco	1954	85	230	-8,9
Carina	1977	105	300	-9,4
Sextans	1990	95	450	-9,0
Sagittarius	1994	21	2600	-13,5

existem várias galáxias elípticas anãs menores no Grupo Local [3]. Essas são chamadas de galáxias anãs esferoidais dSph (*dwarf spheroidal*).

As galáxias satélites da Via Láctea conhecidas antes de 2005 constam na Tabela 1. Na primeira coluna consta o nome e na segunda coluna o ano da descoberta. As nuvens de Magalhães LMC e SMC podem ser classificadas como galáxias irregulares e são visíveis sem telescópio. Na terceira coluna consta a distância em kpc e na quarta coluna consta o raio de meia-luz R em parsec, dentro do qual é emitida a metade da luminosidade. Na última coluna consta a magnitude absoluta no filtro V (visual). Para fins de comparação, o centro da Via Láctea se encontra em uma distância de 8 kpc. A magnitude absoluta do nosso Sol é $M_{V,\odot} = +4,8$. Uma magnitude absoluta $M_V = -10,2$ corresponde a uma luminosidade de $L_V = 10^6 L_\odot$, em que $L_\odot = 3,8 \times 10^{26} W$ é a luminosidade solar.

A primeira galáxia anã satélite da Via Láctea, Sculptor, foi descoberta por Shapley em 1937. Depois dessa descoberta iniciou uma busca de galáxias anãs que continua até hoje. Com o desenvolvimento tecnológico foram descobertas mais galáxias anãs, mas o número não passou de uma dezena até o final do século XX. Do lado teórico havia expectativas bem fundamentadas da existência de mais galáxias anãs com baixas luminosidades.

2 A descoberta das galáxias anãs de brilho ultrabaixo UFD

Um dos levantamentos de imageamento mais extenso das últimas duas décadas é o SDSS (Sloan Digital Sky Survey).¹ Nesse rastreio, trata-se de um estudo observacional realizado com um telescópio de 2,5 m e uma câmera de 120 megapixels que permite observar um campo de 1,5 graus quadrados com alta resolução angular. Foram observados mais que 200 milhões de objetos em uma área celeste de 8400 graus quadrados.

A análise dos dados observacionais do SDSS resultou entre 2005 e 2010 na detecção de uma dezena de novas galáxias anãs e a partir de 2015 foram descobertas mais trinta galáxias anãs, no SDSS e outros rastreios, totalizando até hoje um pouco mais que 50 galáxias satélites da Via Láctea.

As galáxias anãs conhecidas antes de 2005 possuem raios de meia-luz acima de 170 pc e luminosidades acima de $L_V = 2,5 \times 10^5 L_\odot$ que corresponde a uma magnitude absoluta de $M_V = -8,7$.

Em contraste, as galáxias anãs descobertas no SDSS possuem luminosidades até um fator de 1000 menor e raios de meia-luz de apenas 20 pc em casos extremos. As menos luminosas entre as novas galáxias anãs descobertas no SDSS mostram algumas propriedades fotométricas similares aos aglomerados globulares que dificultam a classificação como galáxia.

No entanto, a grande maioria das novas galáxias possui características que permitem uma classificação clara e as distinguem de aglomerados globulares. Entre essas características deve ser mencionada a cinemática estelar que mostra que as novas galáxias são dominadas por matéria escura, os raios que são maiores que os dos aglomerados globulares e as abundâncias de ferro Fe e de outros elementos químicos que mostram grandes variações, indicando formação estelar extensa e enriquecimento químico interno no passado.

As novas galáxias anãs foram denominadas de galáxias anãs de brilho ultrabaixo UFD (*ultra-faint dwarf galaxies*) pelo grupo que as primeiro descobriu [4].

2.1 Definição de uma galáxia anã de brilho ultrabaixo UFD

Imediatamente depois da descoberta das novas galáxias anãs no SDSS não se tinha muita clareza sobre a sua natureza. Poucos anos depois da primeira descoberta, os dados espectroscópicos de estrelas individuais levaram à conclusão de que se trata realmente de galáxias. Ao longo de mais de dez anos de observações das galáxias anãs de brilho ultrabaixo, aumentou cada vez mais a evidência de que se trata de uma continuação da sequência das galáxias anãs esferoidais dSph em direção a luminosidades, massas, raios e metalicidades mais baixas. Portanto, parece que não se trata de uma nova classe de galáxias, mas apenas de galáxias com brilho superficial cada vez menor que torna a sua detecção cada vez mais difícil.

De acordo com as características observadas, foi proposta uma definição para galáxia UFD quando a mesma possui uma luminosidade menor que $L_V = 10^5 L_\odot$ correspondendo a uma magnitude absoluta $M_V = -7,7$. Entre as galáxias anãs descobertas no SDSS depois de 2005, apenas quatro galáxias não podem ser classificadas UFD de acordo com essa definição.

Canes Venatici I não foi descoberta antes por se encontrar em uma distância grande de $D = 210$ kpc. Trata-se de uma galáxia anã luminosa que possui magnitude absoluta $M_V = -8,7$, um raio grande acima de 400 pc e alta metalicidade. Crater II se encontra em uma distância de $D = 120$ kpc, possui magnitude absoluta $M_V = -8,2$ e com um raio de 1 kpc é por um fator quatro mais extensa que as outras galáxias anãs. Leo T encontra-se em uma distância de $D = 400$ kpc, tem magnitude absoluta $M_V = -8,0$ e possui gás neutro e recente formação de estrelas. Estas características são mais típicas para as galáxias anãs esferoidais dSph conhecidas antes da análise do SDSS. Mais uma galáxia, Eridanus II com $M_V = -7,1$, é atípica para as novas galáxias anãs de brilho ultrabaixo por conter um aglomerado estelar.

Segundo a proposta de Willman e Strader [5], uma galáxia é uma coleção de estrelas ligadas gravitacionalmente cujas propriedades não podem ser explicadas pela combinação de bárions e a lei da gravitação de Newton unicamente.

Essa definição pode ser interpretada no sen-

¹<https://sdss.org/>

tido de exigir que a massa dinâmica de uma galáxia UFD seja consideravelmente maior que a sua massa bariônica ou que a metalicidade varie de uma estrela para outra. O primeiro critério indica diretamente a presença de matéria escura, o que não é o caso dos aglomerados globulares, o segundo critério sugere que o objeto se encontra dentro de um halo de matéria escura com massa suficiente para prender o material ejetado por uma supernova aumentando a metalicidade da subsequente geração de estrelas.

As galáxias anãs de brilho ultrabaixo descobertas no levantamento SDSS a partir de 2005, constam na Tabela 2. As galáxias foram escolhidas devido a dados observacionais mais completos, portanto, a classificação como UFD pode ser considerada como confirmada.

Na primeira coluna consta o nome e na segunda coluna a magnitude absoluta. Uma magnitude absoluta $M_V = -5,2$ corresponde a uma luminosidade de $L_V = 10^4 L_\odot$. O significado deste valor torna-se mais claro quando comparado, como exemplo, com Canopus, depois de Sirius a segunda estrela mais brillante do céu noturno que possui uma magnitude absoluta $M_V = -5,5$. A luminosidade de uma única estrela como Canopus é maior que a luminosidade média das galáxias anãs de brilho ultrabaixo.

Na terceira coluna consta a distância em kpc e na quarta coluna o raio de meia-luz R em parsec. Na última coluna consta a metalicidade quantificada através da razão de ferro e hidrogênio [Fe/H] (veja Seção 4). Os dados da Tabela 2 podem ser encontrados em vários artigos a exemplo de [6–10], entre outros da lista da bibliografia e artigos citados neles. A distância da grande maioria das galáxias é menor que 100 kpc. Essa distância corresponde a um módulo de distância $m - M = 20$. Uma estrela como o Sol tem nessa distância uma magnitude aparente de quase 25 mag. Como a maioria das galáxias da tabela possui uma distância menor, estrelas individuais com massa um pouco abaixo de uma massa solar estão dentro do alcance observational de telescópios de grande porte.

Algumas galáxias anãs descobertas no SDSS ainda não foram classificadas UFD devido a dados espectroscópicos escassos ou com valores discrepantes, sendo como exemplo Triangulum II ($M_V = -1,6$, $D = 28$ kpc, $R = 16$ pc, [Fe/H]

Tabela 2: Galáxias anãs de brilho ultrabaixo descobertas depois de 2005 com classificação UFD confirmada.

Nome	M_V	D[kpc]	$R[pc]$	[Fe/H]
Segue 2	-2,0	37	40	-2,1
Hydrus I	-4,7	28	53	-2,5
Horologium I	-3,7	87	40	-2,8
Reticulum II	-4,0	32	50	-2,7
Eridanus II	-7,1	366	246	-2,4
Carina II	-4,5	36	92	-2,4
Ursa Major II	-4,4	35	140	-2,2
Segue 1	-1,3	23	24	-2,7
Ursa Major I	-5,1	100	295	-2,1
Willman 1	-2,9	45	33	-2,2
Leo V	-4,3	170	50	-2,5
Leo IV	-5,0	150	110	-2,3
Coma Beren.	-4,3	42	70	-2,4
Canes Ven.II	-5,2	160	70	-2,4
Boötes I	-6,0	66	190	-2,3
Boötes II	-2,9	42	40	-2,8
Hercules	-5,8	130	200	-2,5
Pegasus III	-4,1	200	80	-2,4
Aquarius II	-4,4	105	160	-2,3
Tucana II	-3,9	60	120	-2,9
Pisces II	-4,2	180	60	-2,5

= -2,2), Hydra II ($M_V = -4,9$, $D = 150$ kpc, $R = 70$ pc, [Fe/H] = -2,0), Draco II ($M_V = -0,8$, $D = 21$ kpc, $R = 20$ pc, [Fe/H] = -2,7) e Grus I ($M_V = -3,5$, $D = 120$ kpc, $R = 30$ pc, [Fe/H] = -1,4). A metalicidade de Grus I é muito maior do que esperado para um sistema tão pequeno. Uma explicação do valor alto de [Fe/H] poderia ser contaminação (veja Seção 3.2), outra possibilidade seria efeito maré causando perda de estrelas individuais de Grus I.

A Figura 1 mostra a distribuição de magnitudes absolutas e raios de meia-luz R para aglomerados globulares, galáxias anãs e candidatos a galáxia anã. Os aglomerados globulares possuem raios $R < 20$ pc, enquanto que as galáxias anãs com brilho maior que $M_V < -4$ possuem raios maiores $R > 40$ pc. Com exceção de alguns candidatos a galáxia UFD com luminosida-

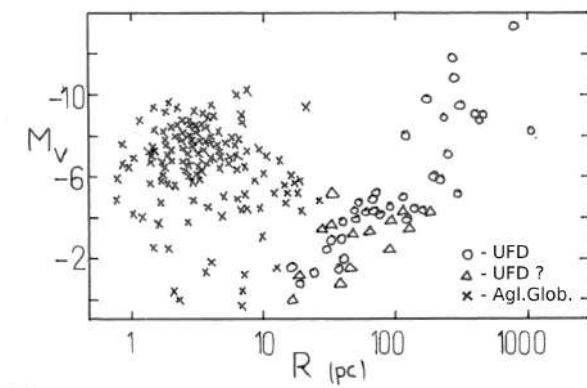


Figura 1: Magnitude absoluta M_V versus raio de meia-luz R [pc] para aglomerados globulares (x), galáxias anãs confirmadas (o) e candidatos a galáxia anã (Δ). A classificação é precisa para objetos mais luminosos que $M_V < -5$. Para objetos menos luminosos há, eventualmente, uma região em comum de aglomerados globulares e galáxias UFD. Figura adaptada com dados de [6] e [11].

des extremamente baixas, é possível distinguir as mesmas dos aglomerados globulares. No caso de luminosidades muito baixas não é sempre possível classificar os candidatos a galáxia UFD unicamente através dos parâmetros fotométricos. Observações futuras podem mostrar se existe uma região em comum de aglomerados e de galáxias anãs para raios entre 10 pc e 40 pc.

As galáxias anãs de brilho ultrabaixo possuem raios de meia-luz entre 24 pc (Segue I) e 295 pc (Ursa Major I) com alguns candidatos UFD com raios de até 15 pc em casos extremos. As galáxias anãs clássicas dSph possuem raios de meia-luz entre 170 pc (Leo II) e 2,6 kpc (Sagittarius).

Um estudo das elipticidades parece indicar uma elipticidade maior para as menores galáxias anãs. No entanto, um teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov não consegue excluir a possibilidade das elipticidades observadas das UFD e das dSph possuirem uma distribuição de elipticidades tridimensionais similar.

Um estudo morfológico parece indicar irregularidades na estrutura das galáxias anãs que poderiam ser resultado de interação gravitacional com a Via Láctea. Uma análise com ajuda de simulações de dados fotométricos mostrou que flutuações devido à estatística de Poisson podem resultar nas estruturas irregulares observadas em regiões de brilho superficial muito baixo.

2.2 Cinemática estelar

O primeiro passo no estudo observational das novas galáxias anãs consistiu em determinar as velocidades radiais de estrelas individuais. As primeiras observações espectroscópicas foram obtidas para Ursa Major I e Boötes I. Os espectros de cinco estrelas de Ursa Major I permitiram determinar uma dispersão de velocidades $\sigma = 9,3 \text{ km s}^{-1}$ [12] e espectros de sete estrelas de Boötes I resultaram em $\sigma = 6,6 \text{ km s}^{-1}$ [13]. Ao considerar as luminosidades $L_V = 9600 L_\odot$ e $L_V = 21900 L_\odot$ das duas galáxias anãs, respectivamente, e supondo uma razão massa-luminosidade de $M/L = 2$ (em unidades solares) que é típica para uma população velha de estrelas com $M = 0,8 M_\odot$, a dispersão de velocidades esperada teria que ser menor que $\sigma < 0,1 \text{ km s}^{-1}$.

Sob a hipótese de se tratar de sistemas estelares em equilíbrio dinâmico e na ausência de estrelas contaminadoras da Via Láctea, a conclusão menos controversa é que essas galáxias não podem ser puramente sistemas bariônicos.

Observações espectroscópicas subsequentes [14, 15] confirmaram os primeiros resultados cinemáticos surpreendentes. A dispersão de velocidades de 27 galáxias classificadas como galáxia anã de brilho ultrabaixo versus magnitude absoluta está representada na Figura 2. Dois erros típicos da dispersão de velocidades são indicados na figura, com erros sendo muito maiores em poucos casos extremos. Pode-se constatar que a grande maioria das galáxias anãs de brilho ultrabaixo mostra uma dispersão de velocidades entre 3 km s^{-1} e 7 km s^{-1} . Não se observa uma tendência entre dispersão de velocidades e luminosidade da galáxia, esse comportamento sendo diferente das galáxias anãs esferoidais dSph nas quais a dispersão de velocidades aumenta com a luminosidade.

3 Massas das galáxias UFD e matéria escura

A dispersão de velocidades obtida a partir das velocidades radiais de estrelas individuais em cada galáxia pode ser usada para determinar a sua massa dinâmica. A conversão da dispersão de velocidades para a massa dinâmica é possível sob algumas hipóteses básicas. Depois de comparar

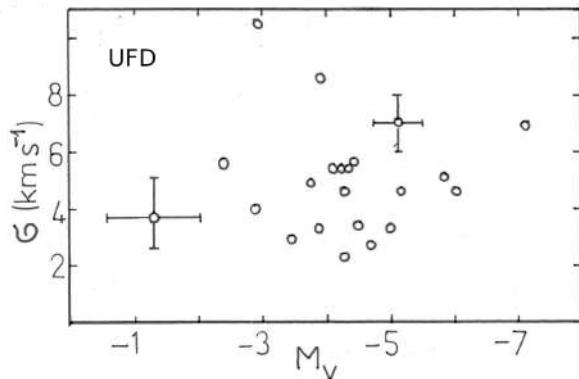


Figura 2: Dispersão de velocidades σ [km s⁻¹] ao longo da linha de visada versus magnitude absoluta M_V para galáxias UFD. Dois erros observacionais típicos são indicados. Algumas poucas galáxias anãs possuem erros significativamente maiores. A distribuição não mostra uma correlação clara entre σ e M_V . Figura adaptada com dados de [6, 14–16] e referências citadas.

a massa dinâmica com a massa estelar luminosa pode ser quantificada a matéria escura.

3.1 Equilíbrio dinâmico

Para determinar uma massa dinâmica confiável, o sistema estelar deve se encontrar em equilíbrio dinâmico. Nesse caso pode ser aplicado o teorema Virial. Se a galáxia teve uma colisão com outro sistema de alta massa no passado recente, a dispersão de velocidades pode desviar consideravelmente do valor de equilíbrio e resultar em uma estimativa errônea de massa. Em torno das galáxias que possuem valores conhecidos da dispersão de velocidades, não são observados objetos de alta massa que podem ter causado um aumento dramático na dispersão de velocidades. Somente massas escuras muito concentradas a exemplo de buracos negros de alta massa, poderiam causar um aumento na dispersão de velocidades sem deixar nenhum rastro visível na sua vizinhança. Por outro lado, uma perturbação violenta deste tipo provavelmente deixaria a morfologia da galáxia anã perturbada por muito tempo o que em geral não é observado.

Uma passagem perto do centro da Via Láctea pode igualmente causar uma perturbação devido a forças de maré e resultar em massas errôneas. Os movimentos próprios das galáxias anãs de brilho ultrabaixo determinados pelo satélite Gaia²

mostram que a maioria das galáxias anãs se encontra próximo ao pericentro na órbita em torno da Via Láctea, mas a distância típica do pericentro de 40 kpc resulta em efeito maré não relevante para a dispersão de velocidades.

3.2 Contaminação

A contaminação da amostra de estrelas individuais nas galáxias anãs devido a estrelas da Via Láctea que se encontram ao longo da linha de visada ou devido a estrelas binárias dentro das galáxias anãs deve ser considerada.

A contaminação por estrelas de primeiro plano pode ser minimizada combinando dados espectroscópicos com os movimentos próprios disponíveis. Em uma análise detalhada foram detectadas algumas estrelas que contaminam a amostra, mas o efeito sobre a dispersão de velocidades foi menor que 10%, reduzindo em um caso de $\sigma = 7,6$ km s⁻¹ para $\sigma = 6,9$ km s⁻¹. Uma pré-seleção de candidatos de estrelas pertencentes à galáxia anã muitas vezes é feita pela velocidade radial. Portanto, uma estrela com velocidade discrepante pode ser excluída antes de determinar a dispersão de velocidades. Devido ao critério de pré-seleção, o efeito de contaminação pode ser maior na determinação da metalicidade.

Estrelas binárias foram confirmadas nas galáxias anãs [17, 18], e as mesmas podem aumentar a dispersão de velocidades quando os parâmetros orbitais mostram uma contribuição alta na velocidade radial. Velocidades altas somente ocorrem em estrelas binárias cerradas sendo estes sistemas de curto período orbital. O único caso de uma estrela binária em uma galáxia UFD com parâmetros orbitais conhecidos é na galáxia anã Hercules com período orbital de 135 dias e com uma variação da velocidade radial $\Delta v = \pm 14$ km s⁻¹ [18]. Alguns outros casos de estrelas binárias com dados orbitais menos completos parecem ter amplitudes na velocidade entre 10 km s⁻¹ e 20 km s⁻¹ e períodos menores que um ano.

A maneira mais fácil de excluir as estrelas binárias é, portanto, observar as estrelas individuais em épocas diferentes. Dessa maneira foram detectadas várias estrelas binárias as quais não aumentaram os valores da dispersão de velocidades das 27 galáxias de maneira significativa.

²<https://sci.esa.int/web/gaia>.

3.3 Massa dinâmica e matéria escura

O teorema Virial escalar na sua forma mais simples pode ser escrito

$$2T + V = 0, \quad (1)$$

onde T representa a energia cinética e V a energia potencial. O teorema Virial nessa forma vale para um sistema autogravitante idealizado que se encontra em equilíbrio dinâmico. Para um sistema autogravitante de N partículas, a energia cinética pode ser escrita por $T = \sum_{i=1}^N m_i v_i^2 / 2$ e a energia potencial $V = \sum_{i < j}^N G m_i m_j / r_{ij}$. Para aplicar o teorema a um sistema autogravitante, a dispersão de velocidades σ determinada através da velocidade radial deve ser corrigida pelo fator de projeção na esfera celeste para obter a velocidade tridimensional. Se as órbitas tridimensionais não são conhecidas, deve-se corrigir a velocidade de maneira estatística. Através da observação da dispersão de velocidades σ e supondo uma distribuição aleatória (quando aplicável) das velocidades, $v_x \approx v_y \approx v_z$, obtém-se estatisticamente a velocidade tridimensional $v^2 = 3\sigma^2$. Observando a distância em projeção entre os N corpos e corrigindo da mesma forma estatística, obtém-se as distâncias tridimensionais r_{ij} . Com o teorema Virial pode se obter finalmente a massa dinâmica total do sistema $\sum_i^N m_i$. Em caso da presença de matéria escura, a mesma aumenta a dispersão de velocidades através da energia potencial mas não contribui para a massa luminosa.

Em uma abordagem mais sofisticada através das equações de Jeans, pode ser derivado o teorema Virial em sua forma tensorial,

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I_{jk}}{dt^2} = 2T_{jk} + \Pi_{jk} + W_{jk}, \quad (2)$$

onde I_{jk} é o tensor do momento de inércia, T_{jk} é o tensor dos movimentos ordenados de escoamento, Π_{jk} é o tensor dos movimentos aleatórios e W_{jk} é o tensor da energia potencial (e.g. [19]). Esse teorema permite, a princípio, analisar sistemas fora do equilíbrio dinâmico. No caso de aplicação a sistemas autogravitantes que se encontram em equilíbrio dinâmico, o momento de inércia I_{jk} é constante e a parte esquerda da (2) é igual a zero. O tensor da energia cinética $K_{jk} = T_{jk} + \Pi_{jk}/2$ permite considerar ve-

locidades anisotrópicas as quais ocorrem frequentemente em sistemas autogravitantes.

Por exemplo, as velocidades estelares na vizinhança solar são descritas por um chamado elipsóide de Schwarzschild que descreve uma dispersão de velocidades diferente para cada coordenada galáctica (u, v, w). Em direção radial u , i.e. em direção ao centro galáctico, a dispersão de velocidades estelares σ_u é significativamente maior do que em direção azimutal (acompanhando a rotação galáctica) ou em direção polar (perpendicular ao disco da Via Láctea).

Uma dispersão anisotrópica também foi usada nos anos 1990 para determinar a massa que se encontra no centro da Via Láctea na posição da radiofonte Sgr A. Um resumo breve desse método pode ser encontrado em [20]. Em anos recentes foi observada pela colaboração EHT (Event Horizon Telescope) a sombra do buraco negro Sgr A*, confirmando uma massa de $4 \times 10^6 M_\odot$. Um resumo das observações e modelos teóricos pode ser encontrado em [21].

Wolf et al. [16] mostraram que no caso de sistemas autogravitantes com anisotropia desconhecida de velocidades, a massa dinâmica mais confiável é a massa $M_{1/2}$ que se encontra dentro do raio $r_{1/2}$, $M_{1/2} = M(r < r_{1/2})$. Aqui, $r_{1/2}$ é o raio tridimensional dentro do qual é emitida a metade da luminosidade do sistema. De acordo com [16], a massa $M_{1/2}$ é dada por

$$M_{1/2} = 930 \left(\frac{\sigma}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{R}{\text{pc}} \right) M_\odot, \quad (3)$$

onde σ é a dispersão de velocidades e R é o raio de meia-luz, que é diretamente observável. Para muitos perfis de luminosidade vale a relação $r_{1/2} = (4/3) R$.

A Figura 3 mostra as massas dinâmicas $M_{1/2}$ determinadas até o raio tridimensional de meia-luz $r_{1/2}$ de acordo com (3). As massas dinâmicas variam entre $10^5 M_\odot$ e $10^8 M_\odot$ para luminosidades entre $10^3 L_\odot$ e $10^7 L_\odot$. A partir de massa e luminosidade pode ser determinada a razão massa-luminosidade M/L . A análise dos dados mostra que as galáxias anãs de brilho ultrabaixo menos luminosas possuem os maiores valores acima de $M/L > 1000$ o que torna as mesmas as galáxias mais dominadas por matéria escura [22].

A natureza da matéria escura permanece desconhecida. Uma parte significativa de matéria

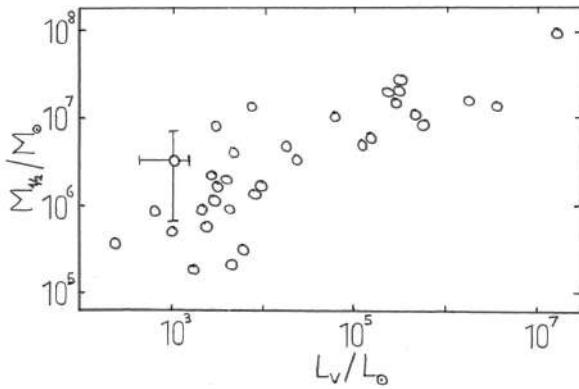


Figura 3: Massa dinâmica $M_{1/2}$ dentro do raio tridimensional de meia-luz $r_{1/2}$ versus luminosidade L_v em unidades solares para galáxias anãs de brilho ultrabaixo. Um erro típico é indicado. Algumas das galáxias menos luminosas têm erros maiores, nas galáxias mais luminosas, os erros são menores que o símbolo. As massas dinâmicas variam entre $10^5 M_\odot$ a $10^8 M_\odot$ e as luminosidades entre $10^3 L_\odot$ e $10^7 L_\odot$ resultando em razão massa-luminosidade M/L muito maior que nas galáxias anãs esferoidais dSph, indicando a presença de quantidades consideráveis de matéria escura. Figura adaptada com dados de [6, 14–16] e referências citadas.

escura bariônica poderia ser em forma de estrelas compactas ou buracos negros sendo estes os estágios finais da evolução estelar. Nas galáxias anãs de brilho ultrabaixo somente são encontradas estrelas velhas com idades superiores a 11 Ga (1 Ga = 10^9 anos) e, portanto, hoje somente podem ser observadas estrelas com uma massa abaixo de $M < 0,8 M_\odot$. Se a função de massa estelar inicial IMF (*initial mass function*) nessas galáxias for sistematicamente diferente que na Via Láctea, seria possível que uma enorme quantidade de anãs brancas ou estrelas de nêutrons esteja presente nessas galáxias.

O exemplo clássico mais conhecido de anã branca é o caso de Sirius B. Sirius A com uma magnitude aparente $m_V = -1,45$ mag é a estrela mais brilhante do céu noturno, encontra-se em uma distância de 2,64 pc e possui uma massa de $M_{Sir,A} = 2,12 M_\odot$. O movimento próprio de Sirius A na esfera celeste mostra pequenos desvios com uma periodicidade de 50 anos, refletindo a órbita de Sirius A nesse sistema binário. No ano 1862, foi descoberta a outra componente do sistema estelar binário tendo magnitude aparente $m_V = 8,5$ mag, Sirius B, sendo uma anã branca com uma massa de $M_{Sir,B} = 0,98 M_\odot$. Apesar de

ter uma massa quase da metade de Sirius A, a sua luminosidade é menor por um fator de dez mil. Mesmo uma grande quantidade de anãs brancas na distância típica das galáxias anãs de brilho ultrabaixo não seria detectável com a tecnologia observational atual.

Uma eventual grande quantidade de anãs brancas presentes nas galáxias UFD requer uma função de massa inicial com um máximo acima de uma massa solar para garantir a fase final do colapso ter terminado no passado sem deixar rastros observáveis até hoje.

A mudança da função de massa inicial IMF teria que ser mais dramática ainda, se uma grande parte da matéria escura hoje se encontrasse em estrelas de nêutrons ou buracos negros estelares. A massa inicial de uma estrela deve ser acima de oito massas solares para a estrela terminar sua evolução como estrela de nêutrons ou buraco negro. A vantagem seria um tempo de evolução muito mais curto. Um número muito elevado de supernovas poderia resultar em metalicidades altas discrepantes se o potencial gravitacional conseguisse prender o material ejetado pelas supernovas. A existência de estrelas de nêutrons parece provável devido a presença de elementos químicos que são resultado do processo-r [17] que pode ocorrer durante a fusão de duas estrelas de nêutrons. Processo-r se refere à captura rápida de nêutrons na síntese de núcleos pesados. Ainda faltam outros indícios teóricos e observacionais para apoiar essa hipótese muito especulativa de uma numerosa população de estrelas de nêutrons ou buracos negros.

Uma outra alternativa, e no momento a que menos gera discussões controversas, é a hipótese de se tratar de matéria escura não bariônica. Nesse caso, as galáxias anãs de brilho ultrabaixo seriam o ambiente mais apropriado para estudar as características da matéria escura não bariônica em pequena escala de poucos parsecs.

4 Metalicidade das galáxias UFD

A metalicidade Z normalmente é definida pela razão da massa de todos metais M_Z (a partir de lítio Li) e da massa de todos elementos incluindo as massas de hidrogênio (X) e hélio (Y), $Z = M_Z/(M_X + M_Y + M_Z)$. A determinação

precisa da metalicidade requer uma análise detalhada de todas as linhas espectrais de uma estrela e, portanto, um espectro de alta qualidade. No caso do Sol, a análise detalhada de milhares de linhas espectrais resulta em uma metalicidade em torno de $Z_{\odot} \sim 0,02$.

No entanto, os espectros de estrelas com magnitudes perto do limite observacional muitas vezes não permitem uma análise quantitativa para todos os metais presentes na estrela. Nesse caso, em um primeiro passo, são usadas as linhas de ferro Fe, calculando a razão do número de átomos de ferro Fe em relação aos átomos de hidrogênio H. O índice comumente usado é $[Fe/H]$ sendo definido por [19]

$$[Fe/H] = \log \left[\frac{N_{Fe}/N_H}{(N_{Fe}/N_H)_{\odot}} \right], \quad (4)$$

onde N_{Fe} é o número de átomos de ferro e N_H é o número de átomos de hidrogênio. O índice $[Fe/H]$ é dado pelo logaritmo da razão dos números de átomos de ferro e de hidrogênio dividido pela razão dos números encontrados no Sol. Deve se notar que a metalicidade determinada assim se refere aos números de átomos enquanto que a metalicidade Z se refere à massa dos átomos.

A Figura 4 mostra as metalicidades $[Fe/H]$ versus magnitude absoluta para galáxias anãs de brilho ultrabaixo UFD e para galáxias anãs esferoidais dSph. Observa-se uma clara tendência com a metalicidade diminuindo quando a luminosidade diminui, a qual pode ser descrita por uma relação proposta por Kirby et al. [23] e sendo válida para todas as galáxias anãs do Grupo Local,

$$[Fe/H] = -1,68 + 0,29 \log \left(\frac{L_V}{10^6 L_{\odot}} \right), \quad (5)$$

onde L_V é a luminosidade da galáxia anã no visual. As galáxias anãs esferoidais dSph seguem essa relação dentro dos erros observacionais e as galáxias anãs de brilho ultrabaixo se encontram na continuação dessa tendência, mas os erros aumentam consideravelmente para brilho menor que $M_V > -5,5$. Na literatura original continua sendo discutido se o motivo da dispersão maior dos valores $[Fe/H]$ são erros aleatórios observacionais ou se há uma variação sistemática devido a efeitos ambientais, como a perda de estrelas devido a efeito maré no campo gravitacional da Via Láctea.

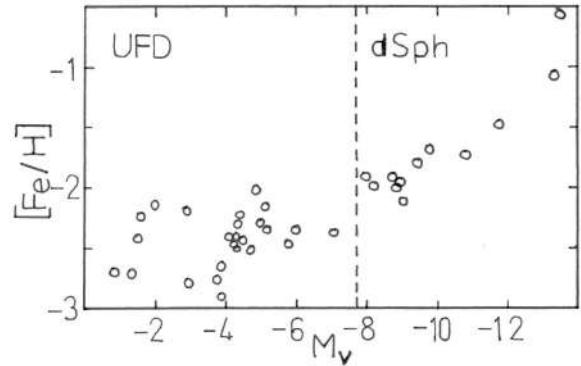


Figura 4: Metalicidade $[Fe/H]$ versus magnitude absoluta M_V para galáxias anãs UFD (esquerda) e para galáxias anãs esferoidais dSph (direita). As galáxias anãs com as luminosidades mais baixas mostram metalicidades por um fator de cem até mil vezes menor que no caso do Sol. Figura adaptada com dados de [6, 18, 24–26].

Um índice $[Fe/H] = -2$ para as galáxias anãs de brilho ultrabaixo significa que há um número de átomos de Fe em relação a hidrogênio por um fator 100 menor que no Sol, e um índice $[Fe/H] = -3$ corresponde a um fator de 1000. Os índices $[Fe/H]$ das galáxias anãs de brilho ultrabaixo mostram que essas são as galáxias conhecidas mais deficientes em metais.

Existem outros índices, a exemplo de $[Mg/H]$, $[Ba/H]$, $[Sr/H]$, $[Eu/H]$, que são usados no estudo das galáxias anãs de baixo brilho quando linhas de magnésio Mg, de bário Ba, de estrôncio Sr ou de európio Eu são detectadas nos espectros estelares com uma intensidade suficientemente alta para permitir uma análise quantitativa [24]. Um índice particularmente importante no estudo das galáxias anãs é $[\alpha/H]$ onde α representa o número total de núcleos de elementos alfa. Elementos alfa são átomos cujos núcleos possuem um número par de prótons e um número igual de nêutrons, i.e. são múltiplos inteiros do núcleo de hélio, a exemplo de $^{12}_{6}C$, $^{16}_{8}O$, $^{20}_{10}Ne$, $^{24}_{12}Mg$, $^{28}_{14}Si$, $^{32}_{16}S$, $^{36}_{18}Ar$, $^{40}_{20}Ca$.

O estudo observational da metalicidade mostra que as galáxias UFD possuem metalicidades mais baixas do que as galáxias anãs clássicas dSph, e que as estrelas de uma galáxia anã mostram valores diferentes, o que não é observado no caso dos aglomerados globulares que possuem metalicidades iguais dentro dos erros observacionais.

Em muitas galáxias anãs de brilho ultrabaixo foram encontradas estrelas extremamente deficientes em metais com $[Fe/H] < -3$. A variação de

metalicidade dentro de uma galáxia indica que a formação de estrelas deve ter continuado sobre um intervalo de tempo suficientemente longo para permitir que o material liberado por supernovas possa se espalhar na vizinhança. O material enriquecido quimicamente deve ser agregado em uma nuvem que entra em colapso gravitacional posteriormente. A variação de metalicidade também indica que o potencial gravitacional deve ser profundo o suficiente para prender o material ejetado pelas supernovas. Se existissem somente as estrelas luminosas nessas galáxias, a velocidade de expansão do envelope da supernova que é da ordem de quase um décimo da velocidade da luz, seria o suficiente para o material se espalhar no espaço intergaláctico, principalmente se a supernova se encontra em uma distância grande do centro da galáxia. Modelos idealizados mostram que um halo de matéria escura com uma massa de $10^7 M_{\odot}$ consegue prender o material ejetado por uma supernova enquanto que halos de massa menor perdem o material [25].

Na discussão da importância de supernovas deve ser distinguido entre supernovas de colapso da região central (*core collapse supernova*) que ocorre no final da evolução de uma estrela individual de alta massa [27] e supernovas tipo Ia que são resultado de uma anã branca que ultrapassa a massa de Chandrasekhar devido a transferência de material da outra componente em um sistema estelar binário. As SN Ia não dependem diretamente do tempo evolutivo de estrelas e, portanto, não ocorrem apenas em estrelas jovens de alta massa.

5 Populações estelares nas galáxias UFD

A análise das populações estelares indica que a maioria das estrelas nas galáxias UFD se formou em alto *redshift* acima de $z \sim 10$ e que a formação de estrelas pode ter continuado até o fim da época de reionização em $z \sim 6$. Uma exceção é Ursa Major I que conseguiu formar apenas a metade das estrelas até $z \sim 3$. Nesse sentido, as galáxias UFD são os remanescentes mais autênticos da época de reionização.

As metalicidades baixas das galáxias UFD as tornam o ambiente mais extremo conhecido no qual ocorreu formação de estrelas e permitem es-

tudar a dependência da função de massa inicial IMF do ambiente. Uma diferença grande com os aglomerados globulares é que as densidades estelares baixas implicam que não houve evolução dinâmica desde a formação das galáxias UFD. A vantagem é que a função de massa observada hoje é idêntica com a função de massa inicial para baixas massas estelares até o ponto de saída da sequência principal de idade zero.

Uma primeira análise das populações estelares em Hercules, Leo IV e Ursa Major I mostrou que as estrelas possuem a mesma idade sendo igual ou maior que a idade das estrelas em M92, um dos mais velhos aglomerados globulares conhecidos [28]. Uma análise espectroscópica mais detalhada nessas galáxias e em Boötes I, Canes Venatici II e Coma Berenices mostrou que 75% das estrelas nessas galáxias se formou em *redshift* maior que $z \sim 10$. A grande maioria das estrelas se formou antes do final da época de reionização $z \sim 6$, consistente com a ideia de que o aquecimento do gás devido à reionização do universo deve ter finalizado o processo de formação de estrelas nessas galáxias [29].

A formação de estrelas não termina de maneira abrupta em todas essas galáxias uma vez que podem existir isoladamente algumas nuvens moleculares de alta densidade as quais podem sobreviver por algum tempo posterior. De um lado foi demonstrado que 90% das estrelas em Hercules e Leo IV são mais velhas que 11 Ga e do outro lado que formação de estrelas deve ter continuado até 8 Ga atrás em Canes Venatici II [26].

A função de massa inicial IMF em Hercules e Leo IV observada no intervalo estreito de massas estelares entre $0,5 M_{\odot}$ e $0,8 M_{\odot}$ sugere uma função de massa inicial com menos estrelas de baixa massa e mais estrelas com alta massa em comparação com a Via Láctea.

Em consequência, deveria ter um número elevado de supernovas durante a evolução da galáxia anã. Estimativas variam entre 15 SN e mais que 250 SN para a galáxia anã Segue 1 que hoje possui uma massa estelar luminosa em torno de $500 M_{\odot}$. Se esse cenário for confirmado, terá implicações importantes sobre a quantidade de matéria escura bariônica nessas galáxias.

A única galáxia anã descoberta no SDSS que possui gás neutro é Leo T. Apesar da sua descoberta com os mesmos métodos que as galáxias

UFD, com base em dados espectroscópicos, Leo T é classificada como dSph. Nas demais galáxias UFD, gás neutro não pode ser detectado e o limite superior para a massa do gás neutro da maioria das galáxias UFD é da ordem de $M_{gas} \sim 100 M_{\odot}$. Somente para as galáxias UFD com distâncias acima de 100 kpc o limite observational para a massa do gás neutro poderia ser por um fator de até dez maior.

Gás ionizado não foi detectado em nenhuma galáxia UFD. A eventual detecção de emissão H α poderia impor limites sobre a quantidade do gás.

A ausência de gás nas galáxias UFD poderia ser causada por vários mecanismos. Uma possibilidade discutida é que na época de reionização do universo poderia ter sido removido o gás restante nas galáxias UFD e dessa forma ter interrompido o processo de formação de estrelas. É o mecanismo que explica o fato de se tratar de uma população de estrelas coevas nas galáxias UFD.

Outro mecanismo possível seria a perda do gás durante eventos de supernovas que poderiam expelir o gás junto com o material ejetado durante a explosão se o potencial gravitacional da galáxia não for profundo o suficiente para prender o material ejetado com velocidades iniciais de quase um décimo da velocidade da luz.

A função luminosidade das galáxias UFD está sendo discutida ainda de maneira controversa. As galáxias UFD observadas até hoje mostram um máximo em torno de $M_V \sim -4$, implicando que o máximo real deve se encontrar em luminosidades mais baixas. De acordo com alguns estudos, a maioria das galáxias UFD teria sido descoberta até hoje, mas outros estudos extrapolam o número total de galáxias satélites da Via Láctea para além de 300. Os números podem ser maiores ainda se muitas galáxias anãs se encontram em distâncias bem maiores que 100 kpc.

6 A importância cosmológica das galáxias anãs de brilho ultrabaixo

As galáxias UFD possuem as menores metalicidades, são os sistemas estelares mais velhos, de menor tamanho, com o menor conteúdo estelar e possuem, provavelmente, a mais simples história de agregação de matéria entre todas galáxias. Portanto, as galáxias anãs de brilho ultrabaixo

representam o limite extremo do processo de formação de galáxias.

Tanto as observações quanto modelos teóricos indicam que as galáxias anãs de brilho ultrabaixo se formaram em alto *redshift* antes da época de reionização e, diferente das demais galáxias, não evoluíram depois da primeira formação de estrelas. Portanto, são essas as galáxias mais autênticas tendo preservado até hoje suas características observáveis as condições físicas da época da primeira formação de estrelas e galáxias no universo.

As galáxias anãs de brilho ultrabaixo encontram-se nos menores halos de matéria escura conhecidos com massas da ordem de $10^8 M_{\odot}$ no momento da formação de estrelas [30] e são, entre os sistemas estelares conhecidos, os com mais baixa fração de matéria bariônica. Essa combinação torna as novas galáxias anãs valiosos laboratórios para estudar a natureza da matéria escura. A expectativa é que as densidades centrais e os perfis de densidade das galáxias anãs de brilho ultrabaixo possam permitir estudar o comportamento de matéria escura em escalas de poucos parsecs.

A formação das primeiras galáxias no universo depende criticamente do mecanismo de esfriamento da nuvem protogaláctica de gás a temperaturas suficientemente baixas para permitir a formação de estrelas. Os minihalos de matéria escura com massas entre $10^6 M_{\odot}$ e $10^8 M_{\odot}$ podem esfriar através de hidrogênio molecular e são os melhores candidatos para a formação das primeiras estrelas no universo, a hipotética População III, para redshift em torno de $z \sim 20$. Minihalos com massas acima de $10^8 M_{\odot}$ podem esfriar através de linhas atômicas de hidrogênio e podem colapsar um pouco mais tarde em torno de redshift $z \sim 10$.

Simulações numéricas da formação das primeiras estrelas e das primeiras galáxias são extremamente complexas e ainda não permitem distinguir entre diferentes cenários. As simulações mais recentes parecem indicar que as massas dos minihalos de matéria escura variam sobre várias ordens de grandeza e sugerem que, no limite inferior de massa, muitos dos minihalos podem permanecer para sempre completamente escuros sem jamais formar estrelas.

7 Conclusão

As galáxias de brilho ultrabaixo UFD no limite inferior em luminosidade são os sistemas estelares luminosos associados com os menores minihalos capazes de formar estrelas.

As observações espectroscópicas e modelos teóricos indicam que a formação de estrelas na maioria das galáxias UFD terminou há 12 bilhões de anos. Nas galáxias UFD de mais baixa massa, o processo de formação de estrelas foi interrompido na época de reionização do universo. Essa ideia é consistente com os dados observacionais disponíveis, mas a amostra de galáxias anãs de mais baixa luminosidade ainda é pequena e falta uma história completa e precisa do processo de formação estelar. Se esse cenário for confirmado no futuro, as novas galáxias UFD realmente representariam uma nova classe de galáxias.

Sobre o autor

Rainer Madejsky (rainer.madejsky@gmail.com) é professor pleno do Departamento de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana. Possui doutorado em Física pela Universidade de Heidelberg (Alemanha) e realizou pós-doutorados na Alemanha, na França e no Chile. Desenvolve pesquisas na área de astrofísica com ênfase em galáxias e cosmologia observational.

Referências

- [1] M. Jones e R. Lambourne, *An Introduction to Galaxies and Cosmology* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004).
- [2] J. Silk, *O Big Bang - A origem do Universo* (Universidade de Brasília, 1988).
- [3] S. van den Bergh, *The Galaxies of the Local Group* (Cambridge University Press, 2007).
- [4] B. Willman et al., *A new Milky Way companion: unusual globular cluster or extreme dwarf satellite?*, *The Astronomical Journal* **129**(6), 2692 (2005).
- [5] B. Willman e J. Strader, “*Galaxy, defined*,” *The Astronomical Journal* **144**(3), 76 (2012).
- [6] J. D. Simon, *The faintest dwarf galaxies*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **57**(1), 375 (2019).
- [7] A. Drlica-Wagner et al., *Eight ultra-faint galaxy candidates discovered in year two of the dark energy survey*, *The Astrophysical Journal* **813**(2), 109 (2015).
- [8] R. R. Muñoz et al., *A MegaCam survey of outer halo satellites. III. Photometric and structural parameters*, *The Astrophysical Journal* **860**(1), 66 (2018).
- [9] S. E. Koposov et al., *Snake in the Clouds: a new nearby dwarf galaxy in the Magellanic bridge*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **479**(4), 5343 (2018).
- [10] B. Willman et al., *Willman 1—a probable dwarf galaxy with an irregular kinematic distribution*, *The Astronomical Journal* **142**(4), 128 (2011).
- [11] W. E. Harris, *A catalog of parameters for globular clusters in the Milky Way*, *Astronomical Journal* **112**, 1487 (1996).
- [12] J. T. Kleyna et al., *Ursa Major: a missing low-mass CDM halo?*, *The Astrophysical Journal* **630**(2), L141 (2005).
- [13] R. R. Muñoz et al., *Exploring halo substructure with giant stars: the dynamics and metallicity of the dwarf spheroidal in Boötes*, *The Astrophysical Journal* **650**(1), L51 (2006).
- [14] N. F. Martin et al., *A Keck/DEIMOS spectroscopic survey of faint Galactic satellites: searching for the least massive dwarf galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **380**(1), 281 (2007).
- [15] J. D. Simon e M. Geha, *The kinematics of the ultra-faint Milky Way satellites: solving the missing satellite problem*, *The Astrophysical Journal* **670**(1), 313 (2007).

- [16] J. Wolf et al., *Accurate masses for dispersion-supported galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **406**(2), 1220 (2010).
- [17] A. P. Ji et al., *R-process enrichment from a single event in an ancient dwarf galaxy*, *Nature* **531**(7596), 610 (2016).
- [18] A. Koch et al., *Neutron-capture element deficiency of the Hercules dwarf spheroidal galaxy*, *Astronomy & Astrophysics* **554**, A5 (2013).
- [19] R. K. Madejsky, *Curso Básico de Astrofísica e Cosmologia*, vol. 2 – Das galáxias aos quasares (UEFS Editora, Feira de Santana, 2015).
- [20] R. Madejsky, *Curso Básico de Astrofísica e Cosmologia*, vol. 1 – O sistema solar, as estrelas e a Via Láctea (UEFS Editora, Feira de Santana, 2014).
- [21] R. K. Madejsky, *Buracos negros supermassivos: III. Sagitário A* no centro da Via Láctea*, *Caderno de Física da UEFS* **20**(1), 1404.1–8 (2023).
- [22] M. Geha et al., *The least-luminous galaxy: spectroscopy of the Milky Way satellite Sgue 1*, *The Astrophysical Journal* **692**(2), 1464 (2009).
- [23] E. N. Kirby et al., *The universal stellar mass-stellar metallicity relation for dwarf galaxies*, *The Astrophysical Journal* **779**(2), 102 (2013).
- [24] L. C. Vargas et al., *The distribution of alpha elements in ultra-faint dwarf galaxies*, *The Astrophysical Journal* **767**(2), 134 (2013).
- [25] D. Webster, R. Sutherland e J. Bland-Hawthorn, *Ultrafaint dwarfs—star formation and chemical evolution in the smallest galaxies*, *The Astrophysical Journal* **796**(1), 11 (2014).
- [26] D. R. Weisz et al., *The star formation histories of local group dwarf galaxies. I. Hubble space telescope/wide field planetary camera 2 observations*, *The Astrophysical Journal* **789**(2), 147 (2014).
- [27] B. W. Carroll e D. A. Orlie, *An Introduction to Modern Astrophysics* (Cambridge University Press, San Francisco, 2007).
- [28] T. M. Brown et al., *The primeval populations of the ultra-faint dwarf galaxies*, *The Astrophysical Journal Letters* **753**(1), L21 (2012).
- [29] T. M. Brown et al., *The quenching of the ultra-faint dwarf galaxies in the reionization era*, *The Astrophysical Journal* **796**(2), 91 (2014).
- [30] M. S. Bovill e M. Ricotti, *Pre-reionization fossils, ultra-faint dwarfs, and the missing galactic satellite problem*, *The Astrophysical Journal* **693**(2), 1859 (2009).

Galáxias: uma perspectiva desde suas origens

Diego Garcia Lambas

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Resumo

Este pequeno artigo procura discutir propriedades relevantes das galáxias à luz de estudos recentes. Dando particular ênfase à sua formação e evolução, questões-chave, como a importância da acreção, matéria escura e processo astrofísico de contrarrecação são brevemente discutidos.

Abstract

This short article aims at setting relevant properties of galaxies in the light of recent studies. By putting particular emphasis on their formation and evolution, key issues such as the importance of accretion, dark matter, and feedback astrophysical process are briefly discussed.

Palavras-chave: galáxias, simulações, fusões.

Keywords: galaxies, simulations, fusions.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43825](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43825)

1 Galáxias: uma perspectiva desde suas origens

Embora as galáxias já tenham sido observadas antigamente (como as Nuvens de Magalhães ou Andrômeda), elas puderam ser identificadas como sistemas fora da Via Láctea apenas na segunda década do século XX, justamente quando a estrutura da nossa galáxia foi entendida pela primeira vez.¹ Nesta época as informações proveniente das galáxias na faixa do ótico. Assim, estes sistemas foram definidos pelas estrelas membros. A espectroscopia permitiu que a expansão do universo fosse descoberta em 1936 pelo desvio para o vermelho² observado nas linhas características dos espectros estelares [1]. Assim, somente uns poucos anos depois da evidência que o universo é constituído por galáxias, grandes sistemas autogravitantes formados por estrelas, nasceu a astronomia galáctica e extragaláctica, e as bases do modelo cosmológico padrão atual.

2 Componentes de uma galáxia

As estrelas são uma componente muito relevante das galáxias guardando informações valiosas da história de formação galáctica. Enquanto a estrutura da Via Láctea, o projeto GAIA deu um giro copernicano em seu estudo e medições de distâncias e cinemáticas das estrelas através de medições de paralaxes, e velocidades tridimensionais. A grande massa de dados de velocidades radiais pelo efeito Doppler, e no plano do céu, com movimentos próprios obtidos via astrometrias precisas em diferentes épocas impulsionaram enormemente o nosso conhecimento da estrutura, dinâmica e evolução da galáxia. Estes estudos tem demonstrado em nossa vizinhança a formação hierarquia das galáxias através de fusões e incorporação de galáxias anãs em forma continua [2].

A dinâmica das estrelas nas galáxias pode ser estudada utilizando a gravitação de Newton pois tanto os campos gravitacionais como as velocidades das estrelas são não relativistas. Estes estudos mostram como os subsistemas possuem diferentes características dos movimentos estelares além das diferenças astrofísicas.

Porém, os subsistemas clássicos das galáxias tais como o halo estelar, o disco ou bojo, não deveriam ser, e não são, completamente homogê-

¹Ver, nesta mesma edição dos *Cadernos de Astronomia*, a tradução do debate entre Shapley e Curtis em 1920 sobre a existência de outras galáxias além da Via Láctea.

²Redshift em inglês

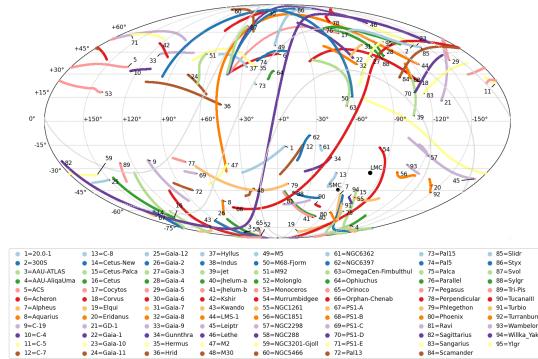


Figura 1: Correntes estelares na Via Láctea. Crédito: C. Mateu e E. Balbinot. Fonte: <https://github.com/cmateu/galstreams>.

neos, pois estes subsistemas tem sido formados a partir da acreção de galáxias anãs durante a história das galáxias. Uma das maiores evidências deste processo manifesta-se nas correntes de estrelas descobertas na Via Láctea. Estas correntes são causadas pelo efeito de maré que causa a desintegração destas galáxias anãs ao longo de suas órbitas em torno da Galáxia deixando excessos de estrelas com assinaturas químicas típicas das populações estelares que caracterizam as diversas galáxias anãs. Assim, mediante a massiva espectroscopia de estrelas na Via Láctea, é possível encontrar estas diferentes correntes que seguem as trajetórias das suas galáxias anãs quando foram incorporadas na Via Láctea. Na figura 1 mostram-se as correntes de estrelas conhecidas atualmente.

O continuo processo de mistura dinâmica incorpora as componentes dos novos sistemas estrelas, gás e matéria escura, formando os diferentes subsistemas clássicos que as constituem. As galáxias podem ser descritas como um conjunto de subsistemas com dinâmicas orbitais diferentes compartilhando a mesma região do espaço. Isto é devido às grandes distâncias interestelares em termos dos raios das estrelas: assim, apesar do grande número de estrelas, os sistemas estelares nas galáxias são essencialmente livres de colisões.

3 As galáxias e a matéria escura

A rotação em equilíbrio das galáxias de tipo espiral (mais do 90% das galáxias luminosas são deste tipo) não pode ser explicada pela dinâmica em termos da massa das estrelas e do gás. Assim, precisa-se de uma componente dominante

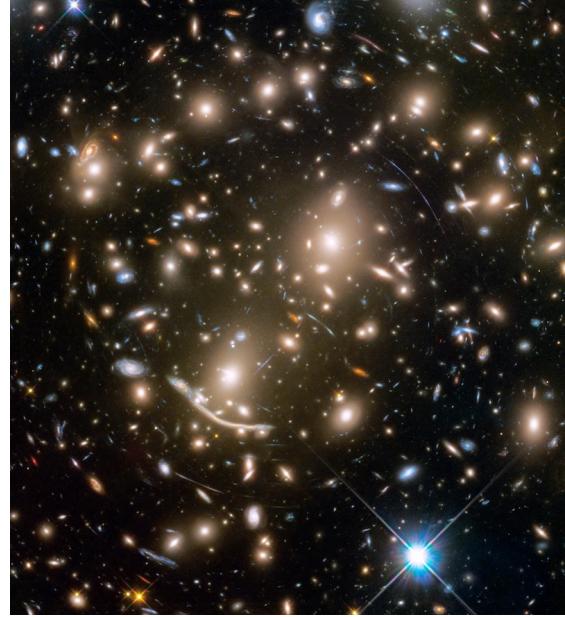


Figura 2: Efeitos de lentes gravitacionais em um aglomerado de galáxias. Crédito: NASA, ESA, J. Lotz e HFF Team (STScI)

de massa no meio interestelar que não pode ser atribuída às componentes conhecidas em forma de estrela. Esta componente manifesta-se notavelmente nas partes externas das galáxias onde a gravitação das componentes estelares diminui dando conta somente de uma parte pequena da massa que se precisa para dar conta da velocidade de rotação observada.

Além das velocidades de rotação a grandes distâncias dos centros das galáxias, a matéria escura evidencia-se com lentes gravitacionais, que são particularmente fortes em aglomerados de galáxias onde as imagens de alta definição tornam possível a detecção de arcos e outras estruturas características. A figura 2 mostra o perfil deste fenômeno no aglomerado de Abel.

4 Tipos morfológicos e massas de galáxias

As galáxias chamadas normais possuem centenas de bilhões de massas solares. Estas galáxias são as que usualmente são objeto de estudos no universo distante porquanto é possível observá-la. Nestas galáxias de grande massa, a diferente proporção relativa dos subsistemas que a constituem definem o seu tipo morfológico. Assim, uma galáxia sem disco será classificada como elíptica, e a medida que aumenta a relevância do disco es-



Figura 3: Diversidade de galáxias. Imagens do Hubble Space Telescope. Credito: NASA, ESA e Adam G. Riess (STSCI, JHU).

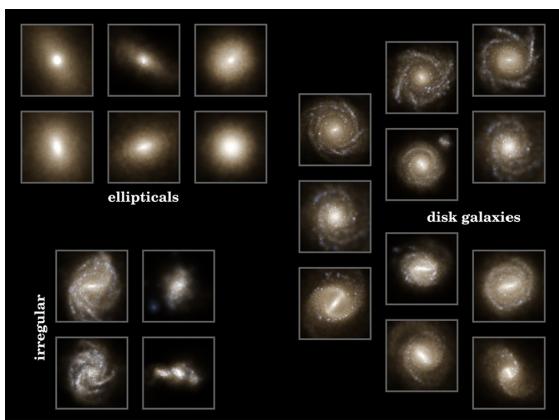


Figura 4: Sequência de Hubble em simulações hidrodinâmicas. Crédito: Heidelberg Institute for Theoretical Studies

telar com respeito à componente do bojo pode-se ver a sequência de Hubble das galáxias. Notamos aqui que as galáxias com disco são chamadas espirais por conta da formação estelar que acontece e que é associada aos braços espirais, mostrando a relevância da componente difusa interestelar nas galáxias. De fato, além das estrelas, existe um complexo meio interestelar nas galáxias, uma fascinante área de estudo em plena expansão atualmente. Este meio interestelar é principalmente formado por gás atômico, gás molecular, campos magnéticos, poeira das explosões estelares, entre outras componentes. O meio interestelar guarda registros de diferentes eventos na evolução das galáxias como ventos de supernovae, fusões, etc.

Existem diferentes relações entre os subsistemas de uma galáxia. Entre elas, podemos mencionar a relação do número de aglomerados globulares no halo das galáxias com a luminosidade total. As galáxias como a nossa Via Láctea possuem centenas de aglomerados globulares, enquanto galáxias anãs apenas uns poucos.

Possivelmente com uma origem primitiva, as

massas dos buracos negros supermassivos centrais nas galáxias possuem relações estatísticas com as propriedades das galáxias hospedeiras, particularmente com a componente do bojo através da dispersão de velocidades de suas estrelas membros. Estas relações mostram a inter-relação das componentes das galáxias através de sua origem comum e evolução conjunta.

De uma maneira simples, as galáxias podem ser descritas também em termos de suas velocidades máximas de rotação. Galáxias como a Via Láctea apresentam velocidades típicas de rotação de 200 km/s, com um máximo de 450 -500 km/s. As galáxias anãs exibem velocidades de rotação de somente dezenas de km/s. Embora essas velocidades sejam pequenas, ainda precisam também de matéria escura para manter o sistema em equilíbrio estacionário.

Surge então a pergunta de como se distinguiria uma galáxia anã de um subsistema de similar massa em estrelas. Aqui uma importante chave para essa distinção é a evolução das galáxias e sua relação com os halos de matéria escura. Os subsistemas estelares conhecidos não têm praticamente evidência de matéria escura, contrariamente as galáxias dominadas por ela. De fato, os movimentos internos das estrelas nos subsistemas de galáxias podem ser descritos completamente considerando somente a massa das estrelas membros, sejam aglomerados abertos ou globulares.

Notamos que os poucos exemplos de galáxias que não têm evidência de matéria escura atualmente, podem ser entendidas mediante a remoção por interações com galáxias vizinhas.

Então, sendo matéria escura primordial como a diferença principal entre um subsistema estelar e uma galáxia, podemos definir as galáxias como sistemas de estrelas num meio interestelar dominados por matéria escura. Um modelo de matéria escura, como por exemplo o modelo Λ CDM, fornece um marco geral para a formação das galáxias onde os halos de matéria escura, e suas sequências de fusões são fundamentais para compreender a formação das galáxias e das estruturas em grande escala.

5 Simulações numéricas

Atualmente, as simulações numéricas são amplamente utilizadas para explicar as diferentes estruturas cósmicas no contexto de um determinado modelo de universo. Estas simulações usam a aproximação newtoniana pois localmente, em escalas de poucas centenas de megaparsecs, onde as flutuações de densidade têm relevância, os campos e as velocidades são não relativistas. De acordo com este modelo, as irregularidades da distribuição de matéria é representada por partículas que seguem trajetórias de acordo com as leis de Newton em coordenadas que se expandem com o fator de escala do universo. Nestas coordenadas comóveis com a expansão, os movimentos são gerados pelo contraste de densidade de massa enquanto que a parte homogênea é afetada somente pela expansão geral do universo conjuntamente com as outras componentes da energia no universo, como a radiação.

Estas simulações sem colisões, chamadas também *dark matter only* (apenas matéria escura), podem ser estendidas para incorporar equações da hidrodinâmica que consideram também a energia interna do sistema. Neste caso, é importante considerar os efeitos da dissipaçāo desta energia em um gás, um processo que pode continuar até a formação de estrelas. Neste ponto, acontece uma transformação de fase no meio, e as simulações devem ser complementadas com receitas para ter em conta a maneira em que o gás se transforma em estrelas, assim como os processos de retroalimentação da energia do gás originado na radiação e nos ventos das explosões estelares.

6 Fusões de galáxias

No modelo cosmológico padrão atual, o processo da formação da estrutura no universo tem implícito o papel predominante das fusões de galáxias. Isto é, as perturbações primordiais em escalas pequenas são dominantes, dando lugar a numerosos halos de baixa massa que evoluem simultaneamente com a acreção e a direção das grandes estruturas. Assim, sistemas destes halos de baixa massa com suas galáxias associadas, concorrendo a um processo de colapso global a estruturas maiores como filamentos e aglomerados, dariam lugar a um grande número de fusões.

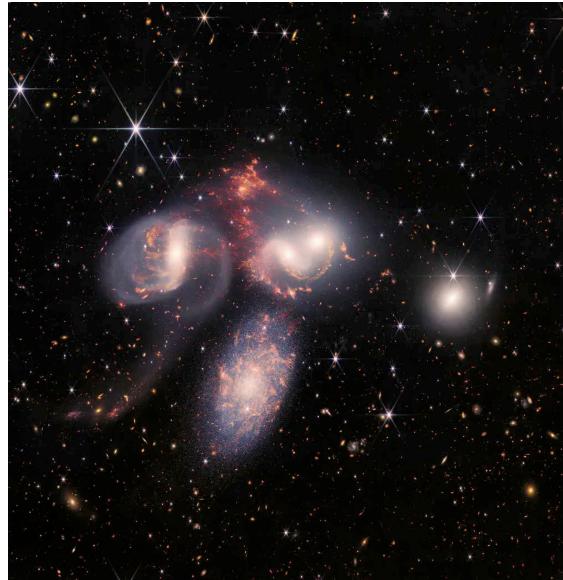


Figura 5: Grupos de galáxias. Quinteto de Stephan na imagem do JWST. Crédito: NASA, ESA, CSA e STScI.

Essencialmente, uma fusão entre um par de galáxias acontece quando o parâmetro de impacto é da ordem dos sistemas estelares, com a condição que a velocidade relativa não exceda a dispersão de velocidades das estrelas no sistema maior, aproximadamente de 200 km/s para galáxias como a Via Láctea. Devido a isto, os grupos de galáxias são os ambientes mais eficientes para o desenvolvimento de fusões, pois os aglomerados massivos já possuem dispersões bem maiores, da ordem de 1000 km/s.

No universo local este mecanismo continua dando lugar a importantes processos de evolução das galáxias tais como a evolução dos buracos negros centrais, transformação morfológica, formação estelar e processos do meio interestelar.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Júlio Fabris pelo convite a escrever este artigo, seus comentários sempre oportunos e afiados, suas correções e, principalmente, pela sua confiança e amizade.

Sobre o autor

Diego Garcia Lambas (diego.garcia.lambas@unc.edu.ar) é professor e pesquisador do CO-

NICET na Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Foi também diretor do Observatório Astronômico de Córdoba e do Instituto de Astronomia Teórica e Experimental (IATE).

Referências

- [1] E. Hubble, *Effects of red shifts on the distribution of nebulae*, *The Astrophysical Journal* **84**, 517 (1936).
- [2] A. Helmi, *Streams, substructures and the early history of the Milky Way*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **49**(1), 493 (2011).
- [3] H. Mo, F. van den Bosch e S. White, *Galaxy Formation and Evolution* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
- [4] M. Vogelsberger et al., *Properties of galaxies reproduced by a hydrodynamic simulation*, *Nature* **509**(7499), 177 (2014).

Por que a União Soviética perdeu a corrida tripulada à Lua?

Alberto Silva Betzler

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Resumo

Há quase setenta anos, após o lançamento do Sputnik-1 e do início de uma série de satélites com massas da ordem de toneladas, a União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) demonstrou que possuía foguetes com maior capacidade de carga que seus equivalentes no resto do mundo, fruto de um programa com alto nível de desenvolvimento fundamentado em uma eficiente rede de pesquisa e desenvolvimento na área espacial. Isto sugeriu que o próximo passo natural era a conquista da Lua e dos demais planetas do Sistema Solar. Porém, os programas soviético e estadunidense estavam em níveis completamente diferentes menos de dez anos depois: O cosmonauta Komarov havia morrido no primeiro teste de voo da Soyuz-1 e a Apollo-8 fazia a primeira circunavegação tripulada Terra-Lua. Após o primeiro pouso lunar americano em julho de 1969, autoridades soviéticas anunciaram ao mundo que nunca houve um programa destinado ao pouso de cosmonautas na superfície lunar. Com o fim da URSS, em 1991, documentos secretos sobre este assunto começaram a ser liberados revelando o contrário. As razões para a falta de êxito da URSS em colocar cosmonautas na superfície lunar são complexas e variadas, sendo analisadas neste trabalho.

Abstract

Almost seventy years ago, after the launch of Sputnik-1 and the beginning of a series of satellites with a mass in the order of tons, the Union of Soviet Socialist Republics (USSR) demonstrated that it had rockets with a larger payload capacity than their counterparts elsewhere in the world. This was the result of a highly developed program based on an efficient space research and development network. This suggested that the next natural step was the conquest of the moon and the other planets of the solar system. Less than ten years later, however, the Soviet and American programs were on a completely different level: cosmonaut Komarov had died in the first Soyuz-1 flight test and Apollo-8 undertook the first manned orbit of the moon. After the first American moon landing in July 1969, Soviet officials announced to the world that there had never been a program aimed at landing cosmonauts on the lunar surface. With the end of the USSR in 1991, secret documents on the subject were published, revealing the opposite. The reasons for the USSR's lack of success in landing cosmonauts on the lunar surface are complex and varied and are analyzed in this article.

Palavras-chave: astronáutica, União Soviética, corrida espacial.

Keywords: astronauts, Soviet Union, space race.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.42430](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.42430)

1 As origens do programa espacial da URSS e projeto lunar

A história do programa espacial soviético está intimamente ligada às necessidades de defesa do país. A utilização dos mísseis V-1 e V-2, no bombardeio a Londres e a Antuérpia, durante sete meses a partir de entre 13 de junho de 1944, demonstrou aos dirigentes das potências envolvidas no conflito que no futuro, uma nação poderia vencer uma guerra sem precisar enviar soldados em território inimigo; algo sem precedentes na história.

Em seu auge, menos que 20% dos lançamentos espaciais estavam associados a propostas de elevação do prestígio nacional, como missões espaciais exclusivamente cívicas destinadas à investigação do Sistema Solar [1].

A ideia da utilização de foguetes como veículos para atingir o espaço foi desenvolvida na Rússia, na segunda metade do séc. XIX, pelo professor de matemática Konstantin E. Tsiolkovskiy (1857-1935). Entre 1883 e 1932, Tsiolkovskiy desenvolveu um trabalho teórico associado a foguetes e sua utilização no voo espacial. Em sua concepção, o homem deveria deixar a Terra e colonizar

o espaço. Tais ideias foram à base de um tipo de ideologia espacial que guiou toda uma geração de engenheiros e cientistas soviéticos. Grupos de jovens engenheiros, entusiastas em Astronáutica, orientados pelos trabalhos de Tsiolkovskiy iniciaram estudos de foguetes. Alguns dos membros destes grupos, como Sergei P. Korolev (1907-1966), Valentin P. Glushko (1908-1989), e Vladimir N. Chelomei (1914-1984) se tornaram os projetistas-chefes que levaram a URSS a conquistar o espaço. Entretanto, muitos outros talentos em engenharia de foguetes foram presos durante expurgos ocorridos antes da Segunda Guerra Mundial, e levados *Sharashkas*, que eram escritórios-prisão que realizavam projetos de engenharia.

O emprego intensivo de tecnologia durante a Segunda Guerra Mundial motivou que os *Sharashkas* fossem voltados para o atendimento de necessidades de defesa. Durante este período, a pesquisa soviética estava concentrada na criação de foguetes para auxílio da decolagem (*Jet-Assisted Take-off*; JATO), bem como aeronaves interceptadoras movidas a motor-foguete como o RP-318, BI-1 e o Malyutka. Somente depois do fim da guerra, começou o trabalho relativo a foguetes de grande alcance como o veículo de quatro estágios Tikhonravov MK e os mísseis D-1 e D-2 de Korolev. Tais desenvolvimentos foram possíveis devido ao estudo dos projetos e dos próprios foguetes alemães a partir de 1945. Entretanto, tais conhecimentos estavam ficando rapidamente, pois os principais cientistas, engenheiros e boa parte do hardware do programa de foguetes alemão caíram em mãos ocidentais. Em um decreto de 13 de março de 1946, Stalin determinou que deveriam ser criados diversos institutos de pesquisa com o objetivo de desenvolver a tecnologia de foguetes e vários milhares de técnicos alemães foram transferidos para a URSS também com este propósito. Matemáticos como Mstislav V. Keldysh (1911-1978) e o engenheiro Aleksei M. Isayev (1908-1971), dentre outros, foram nomeados como chefes desses novos institutos. Diversos projetos foram originários destes institutos como o Bombardeiro Keldysh, um veículo intercontinental tripulado movido à propulsão de foguete, baseado no espaçoplano alemão Saenger, cujo desenvolvimento foi exigido pelo próprio líder soviético Iosif Stalin (1879-1953). Tal pes-

quisa levou, nos anos subsequentes, ao desenvolvimento de mísseis de cruzeiro intercontinental como o Buran e Burya e pesquisas com aviões-foguete, tais como o LL e o I-270, mas que não levaram a nenhum veículo aéreo ou espacial efetivamente operacional. Em 15 de março de 1950, Mikhail K. Tikhonravov (1900-1974) apresentou um artigo onde apontava os usos potenciais de satélites artificiais. O impacto deste artigo e trabalhos subsequentes foi um decreto de 26 de maio de 1954, ordenando estudos preliminares destes sistemas espaciais. A base tecnológica para estes estudos foi o projeto N-3, que analisa diversas possibilidades de sistemas de propulsão e combustível para foguetes. Em agosto de 1955, um grupo foi criado por Korolev para se integrar ao de Tikhonravov a fim de desenvolver o primeiro satélite artificial. O R-7 8K71, o primeiro míssil balístico intercontinental (ICBM na sigla em inglês) do mundo, oriundo do Bureau de Korolev, foi considerado operacional em 1957 e, devido a sua grande capacidade de carga, foi o veículo escolhido para lançar o satélite artificial.

Em duas horas de discussões, em janeiro de 1956, o gabinete executivo soviético definiu os possíveis usos para os satélites soviéticos: comunicações, sensoriamento remoto, navegação, meteorologia e geodésia. O primeiro plano espacial soviético do decreto de 30 de janeiro de 1956 tinha os seguintes objetivos: a) Satélites em órbita com massa de 1,8 até 2,5 toneladas até 1958. b) um satélite não-tripulado destinado a reconhecimento até 1970 c) Um voo espacial, com duração de uma semana, até 1964.

A meta (a), associada ao satélite artificial terrestre (ISZ), foi iniciada com estudos feitos em um laboratório de física que caracterizava o possível meio ambiente espacial. Em julho de 1956, Tikhonravov completou o desenvolvimento do projeto ISZ. O passo seguinte, a construção do satélite e seu sistema de acompanhamento na Terra, foi autorizado em um decreto de 03 de setembro de 1956. Como o projeto ISZ não estaria pronto a tempo para ser lançado antes do equivalente americano, dois pequenos satélites (Sputnik-1 e 2) foram construídos às pressas. O resultado deste trabalho foi Sputnik-1, uma esfera de metal polido com 58 cm de diâmetro e 83 kg de massa, foi lançada em 04 de outubro de 1957, se tornando o primeiro satélite artificial terrestre, destacando

o pioneirismo soviético na Astronáutica. O ISZ, com uma massa de 1,4 toneladas, foi finalmente lançado em 1958 e denominado de Sputnik-3.

O Projeto preliminar de uma nave tripulada, a Vostok 3KA, associada ao objetivo (c), foi completado em abril de 1958, pelo grupo liderado por Tikhonravov. Entretanto, este trabalho ocorreu em paralelo ao projeto militar Zenit de satélites de reconhecimento fotográfico, considerado o mais importante. Korolev advogou junto às autoridades soviéticas que um voo espacial tripulado deveria ter prioridade. Após disputas com os militares, uma solução intermediária foi encontrada. Korolev foi autorizado a continuar a desenvolver a nave tripulada, desde que tal veículo pudesse também ser utilizado como base para construção dos satélites de reconhecimento militares.

Em novembro de 1958, o conselho de projetistas chefes aprovou o programa combinado Zenit/Vostok. O decreto oficial para o início do desenvolvimento foi assinado somente em 22 de maio de 1959 sendo seguido, três dias depois, do decreto para a construção dos satélites Zenit-2 e 4, baseados no design da Vostok. O primeiro voo tripulado da Vostok ocorreu em 12 de abril de 1961, tornando o cosmonauta Yuri A. Gagarin (1934-1968) o primeiro ser humano a entrar em órbita da Terra. Nesta missão, a Vostok I bateu os recordes de velocidade (7,8 km/s) e de altitude (315 km) para um engenho tripulado. Três comunicados oficiais foram redigidos para divulgação pública ao mundo, sendo dois destinados a explicar a falha e um para o êxito do voo. Após 1,8h de voo, a Vostok acionou os retrofoguetes a fim de diminuir sua velocidade e, consequentemente, a altitude para reentrar na atmosfera. O módulo de serviço da Vostok e a cápsula esférica Sharik, na qual Gagarin estava abrigado, ainda permanecem ligadas por um cabo durante parte da reentrada. Nesta fase, o conjunto começou a fazer cambalhotas, até que o cabo se rompeu e a cápsula naturalmente encontrou seu equilíbrio aerodinâmico e o escudo térmico se posicionou corretamente. Após atingir uma altitude adequada, Gagarin ejetou da Sharik (que é diminutivo de Shar, que significa esfera), conforme planejado, e desceu ao sudoeste de Engels Smelovka, na região de Saratov (Rússia). Tal fato foi negado pela URSS durante anos, pois os recordes associados ao voo somente seriam reconhecidos pela *Fédération*

Aéronautique Internationale (FAI), se Gagarin tivesse retornado a Terra no interior da cápsula Vostok. Com a morte de Gagarin, em 1968, o cosmonauta foi reconhecido pela FAI como o primeiro ser humano a efetuar um voo espacial e a partir deste ano, foi instituída a medalha de ouro Yuri A. Gagarin.

Com os resultados obtidos a partir de 04 de outubro de 1957, o plano espacial de 1956 foi acelerado e Korolev foi autorizado a desenvolver novos estágios superiores para o foguete R-7, possibilitando lançamentos de sondas não tripuladas para a Lua e os planetas. Além de competir com os americanos, Korolev estava também em disputa com outros projetistas-chefes soviéticos que desejavam tomar parte na corrida espacial. O principal rival de Korolev foi Chelomei, que havia trabalhado no desenho de mísseis navais de cruzeiro. Após dar um emprego ao filho do líder soviético Nikita S. Khrushchev (1894-1971), e seus projetos terem concordância com a política de racionalização da indústria de defesa, implementada pelo líder soviético, Chelomei foi retribuído em 1959 com a chefia de seu próprio Bureau, o OKB-52. Posteriormente, o OKB-52 absorveu diversas fábricas e institutos de pesquisas ligados na área aeroespacial, concedendo ao Bureau de Chelomei grande capacidade técnica e recursos materiais para desenvolvimento de seus projetos.

O trabalho desenvolvido neste novo Bureau estava associado aos estudos prévios de Chelomei com mísseis de cruzeiro. Estes foguetes podiam ser armazenados durante muito tempo em recintos com condições ambientais controladas. Chelomei propôs então que esta tecnologia poderia ser aplicada em mísseis balísticos e em veículos espaciais. Em função disso, o OKB-52 se concentrou no desenvolvimento de naves espaciais chamadas de *kosmoplans* e *raketoplans*, que poderiam ser construídas em elementos modulares. Tais veículos poderiam ser lançados ao espaço com a utilização de foguetes, também modulares, os UR (Foguetes Universais), capazes de também serem usados como ICBMs. Nesta família de lançadores, O UR-200 se destinaria para o lançamento de pequenos *kosmoplans*, com massas da ordem de 10 toneladas, em órbita da Terra, e o UR-500 Próton 8K82 para impulsionar *kosmoplans/raketoplan* tripulados para pouso na superfície lunar e voos interplanetários.

Korolev, em uma carta de janeiro de 1960, destinada ao comitê central do partido comunista, propôs um programa agressivo para a “conquista comunista do espaço”. Entre suas propostas, estava a do envio de naves com a capacidade de transportar de dois a três tripulantes para viagens de sobrevoo e, posteriormente, pouso na Lua, Vênus e Marte; a construção de estações espaciais capazes de destruir quaisquer satélites e foguetes que sobrevoem o território soviético e a colocação de foguetes globais em órbita terrestre, que poderiam bombardear qualquer ponto da superfície terrestre com uma “chuva de ogivas nucleares”, totalizando uma massa de 40 a 100 toneladas.

A carta foi seguida de uma reunião de Korolev com Khruschchev sobre o assunto, em 03 de março de 1960. Nesta ocasião, Korolev acreditava que as metas de seus projetos só seriam possíveis com o desenvolvimento de um foguete lançador com grande capacidade de carga, em pouquíssimo tempo. Entretanto, durante a reunião, Korolev revelou a Khrushchev que seu plano não era um consenso entre todos os projetistas chefes. O premier solicitou, então, um plano de consenso. Em 30 de maio de 1960, Korolev retornou com um projeto que agora incluía a participação dos projetistas chefes rivais, mas sem nenhuma consulta mais aprofundada entre os militares, e concentrando em seu Bureau qualquer projeto associado a viagens à Lua. Mesmo sob estas circunstâncias, o decreto governamental 715-296 de 23 de junho de 1960, “Sobre a produção de vários veículos espaciais, satélites, espaçonaves para as forças espaciais militares de 1960 até 1967” foi autorizado. Dentre os projetos aprovados estavam o desenvolvimento dos foguetes da família N de Korolev, para lançamento de 40 a 50 toneladas de cargas em órbita baixa ao redor da Terra e 10 a 20 toneladas a serem enviadas ao planeta Marte, e do UR-500. Este lançador de Chemolei era destinado ao lançamento de espaçonaves aos planetas próximos à Terra. Deste último projeto se originou o foguete Proton, utilizado até os dias de hoje.

Aparentemente, com estas ações, o caminho para a conquista da Lua e de outros corpos do Sistema Solar pelos soviéticos estava garantida com a existência de um plano estratégico e a disposição de recursos financeiros para tal.

2 Projetos lunares

A nave Vostok possibilitou que a URSS tivesse a liderança na corrida espacial até a primeira metade da década de 1960. Estudos posteriores ao projeto Vostok foram conduzidos por Tikhonravov em 1959, tendo como objetivo o envio de uma nave tripulada para efetuar a primeira circunavegação lunar. Os estudos demonstraram que com o uso do mais poderoso lançador disponível, o R-7 de Korolev, ou suas possíveis variantes, a carga útil a ser lançada em órbita da Terra era de seis toneladas, insuficiente para a realização da missão. Neste cenário, seriam necessários diversos lançamentos do R-7 para montagem da nave em órbita. Entre 1960 e 1961, devido a esta limitação, foram analisadas técnicas de acoplagem automática, abastecimento e montagem das estruturas em órbita para construção do veículo lunar recentemente chamado de L-1. Enquanto ocorriam tais estudos, Korolev se dedicava ao estudo da cápsula que abrigaria os cosmonautas em sua viagem até a Lua. O trabalho de Korolev, no desenho da cápsula, se mostrou mais complexo do que o esperado, devido a limitações de massa impostas pelo R-7. Para solucionar este problema, Korolev contou com a ajuda de notáveis especialistas em aerodinâmica como Vladimir M. Myasishchyev (1908-1978). Em 1962, surgiu o desenho clássico da nave Soyuz (união). O resultado deste trabalho foi primoroso. Em comparação, a cápsula Apollo possuía uma massa de 5000 kg e provia a tripulação seis metros cúbicos de espaço habitável. Para uma missão circunlunar, adiciona-se a esta massa mais 1800 kg, associados ao módulo de serviço que proporciona a cápsula propulsão, eletricidade e outras necessidades. A Soyuz disponibiliza nove metros cúbicos para a mesma tripulação, em dois módulos habitáveis e um de equipamentos, com a mesma massa da cápsula Apollo.

A nave Apollo foi utilizada durante um pouco mais de dez anos enquanto a Soyuz, em versões mais modernas, é utilizada até os dias de hoje.

Naquela época, somente Korolev tinha a autorização formal de trabalhar com viagens tripuladas à Lua. Entretanto, em 13 de maio de 1961, Chelomei foi autorizado informalmente por Khrushchev para iniciar, em paralelo aos projetos de Korolev, o desenvolvimento de um veículo espa-

cial tripulado como uma resposta ao programa Apollo. Associado a esta nave estava o lançador UR-500, incluído no decreto de junho de 1960. A vantagem do UR-500 estava associada à necessidade de apenas um lançamento para impulsionar a nave na direção da Lua. Recursos para o projeto lunar de Chelomei foram, informalmente, associados aos programas *raketplan* e Cosmoplan [2]. Para a frustração de Korolev, somente versões militares da Soyuz (P e R) receberam recursos para desenvolvimento, enquanto a Soyuz-A, destinada a viagens à Lua, não foi incluída no programa espacial da URSS de 1961. Isto pode ser justificado pela necessidade de um único lançamento da versão do foguete UR-500K para impulsionar a nave LK-1 de Chelomei para a Lua. Entretanto, Chelomei não tinha autorização formal para projetar a LK-1 ou qualquer lançador espacial para esta função. Isto implicou, efetivamente, em uma descontinuidade oficial do programa lunar tripulado soviético. Os projetos para desenvolvimento de naves e veículos lançadores continuaram a ser informalmente desenvolvidos nos Bureau. A conquista lunar não era oficialmente uma prioridade do estado soviético.

Apesar deste aparente contratempo, o desenho do lançador N-1 foi completado em 16 de maio de 1962. Este projeto foi apresentado aos outros projetistas-chefes entre 02 e 16 de julho de 1962. Após extensivos estudos do projeto se definiu que o N-1 deveria ter a capacidade de lançar 75 toneladas de carga a uma altitude de 300 km. Tal carga útil foi considerada a necessária para o lançamento de missões de propostas variadas como viagens de circunavegação lunar ou pouso na superfície. A comissão aprovou o projeto, mas o programa ainda estava sem uma missão autorizada. Em outra reunião, ocorrida em agosto de 1961, entre Khrushchev e os projetistas chefes, o premier ordenou o início de um programa que previa o lançamento de uma estação militar tripulada de 75 toneladas com o objetivo de efetuar bombardeios nucleares em qualquer ponto da superfície terrestre. Esta estação seria, então, a primeira carga útil do N-1. Para tanto, foi assinado em 24 de setembro de 1962, um decreto autorizando a produção do N-1.

Korolev já tinha autorizado seu foguete lunar, mas não uma nave para ele. Em 23 de setembro de 1963, Korolev submeteu um plano de ativi-

dades espaciais entre 1965 e 1975 às lideranças soviéticas. Neste plano, Korolev introduziu no programa para exploração lunar, a Soyuz como veículo e circunavegação lunar L1. No projeto apresentado mais quatro naves L-2, L-3, L-4 e L-5 seriam lançadas posteriormente a L-1. As missões L-1 e L-2 utilizariam um lançador derivado do R-7, o Soyuz 11A511, sendo necessários pelo menos seis disparos para suas montagens em órbita.

A L-1 propunha uma circunavegação lunar de dois tripulantes com duração de sete a oito dias, a uma distância mínima de 1000 a 20.000 km da superfície lunar.

A L-2 era uma nave não tripulada, destinada a transportar para a superfície lunar um veículo robótico. O veículo teria a missão de caracterizar o seu sítio de pouso de maneira mais exata do que poderia ser feito em órbita, além de investigação física da superfície e do meio ambiente lunar. O veículo usaria como fonte de energia um pequeno reator nuclear e possuiria um transmissor para o fornecimento de um sinal de guiagem para o futuro pouso de naves tripuladas. O veículo do projeto L-2 pode ser considerado como um ancestral direto dos Ye-8 Lunokhod, os andadores lunares soviéticos do início da década de 1970.

A L-3 seria a primeira missão tripulada destinada a pousar na superfície lunar. A nave foi concebida para pousar diretamente na superfície lunar após sua montagem na órbita terrestre, com dois a três tripulantes. Para montar a L3 de 200 toneladas, seriam necessários três lançamentos do N-1. O tempo total da missão foi estimado entre dez a dezessete dias, com 2,5 a 3,5 dias gastos, respectivamente na viagem Terra-Lua e Lua-Terra. De cinco a dez dias seria o tempo destinado à exploração da superfície pelos cosmonautas.

O complexo orbital tripulado L-4 seria uma estação espacial com massa total de 75 toneladas, destinado a efetuar um mapeamento da superfície lunar.

O L-5 é um laboratório móvel que poderia acomodar três tripulantes e se movimentar na superfície lunar a uma velocidade máxima de 20 km/h. O transporte dos cosmonautas da Terra até a superfície lunar e o L-5, seria feito mediante o uso de um complexo L-3.

Após a apresentação do projeto, Korolev teve outro encontro com Krushchev, em 24 de março

de 1964, na qual ele advogou novamente por ações mais agressivas para exploração lunar e planetária. Desta vez, o premier ficou convencido da necessidade do pouso lunar em função da grande evolução do projeto Apollo dos EUA.

Percebendo um apoio político por parte de Krushchev, Korolev escreveu uma carta destinada a Leonid I. Brezhnev (1912-1982), que naquela época era responsável pela administração do programa de desenvolvimento de mísseis. Nesta carta, Korolev fez reclamações relativas ao atraso na construção do N-1, devido a falhas no financiamento do projeto. Um bom exemplo é a verba destinada à construção do complexo de lançamento do N-1 em 1964. Dos 11 milhões de rublos do orçamento, somente sete milhões haviam sido recebidos. Na carta, Korolev também tentou sabotar o projeto circunlunar de Chelomei afirmando que era uma perda de tempo devido a utilização de propelentes de baixa energia de Glushko e que um único lançamento do N-1 poderia colocar uma nave Soyuz em uma missão equivalente.

Finalmente, em 03 de agosto de 1964, o comitê central do partido comunista autorizou o desenvolvimento e produção dos veículos UR-500K/LK-1 de Chelomei e o N1/L-3 de Korolev.

Chelomei informalmente teve a permissão para desenvolver o lançador de três estágios UR-500K e o LK-1 anos antes da publicação da ordem anterior. Graças a isto, os desenhos dos veículos estavam bastante adiantados de modo que uma estimativa previa a construção de 12 LK-1 entre 1965 e 1966, com o primeiro voo previsto para 1967.

A cápsula da LK-1 tem essencialmente a mesma forma da equivalente da Apollo, mas muito menor, com 2,8m de diâmetro em comparação com os 3,9m desta última. A nave de 17 toneladas poderia ser colocada em uma órbita estacionária pelo UR-500K e os próprios propulsores da LK-1 a colocariam em uma trajetória translunar e executar quaisquer correções de curso. No dia 13 de outubro de 1964, somente dois meses após o lançamento do projeto, Khrushchev foi retirado do poder devido a ascensão do grupo de Brezhnev ao controle do Politiburo. Com esta mudança de poder, muitos dos projetos como o *raketplan*, *kosmoplans* e o UR-200 de Chelomei foram cancelados. Com isto, Korolev fez uma nova tenta-

tiva para retomar o controle sobre o programa lunar, mas não obteve sucesso: uma comissão liderada por Keldysh permitiu a continuidade no programa UR-500K/LK-1.

Enquanto, não conseguia a aprovação para o desenvolvimento da Soyuz-A, o bureau de Korolev trabalhou no projeto da nave orbital terrestre Soyuz 7K-OK, que havia sido autorizada em um decreto de 03 de dezembro de 1963, enquanto desenvolvia, em segundo plano, a sua versão lunar, a 7K-L1 [3].

Como o projeto Soyuz estava de acordo com o cronograma e o LK-1 com um grande atraso, em uma reunião ocorrida em 25 de agosto de 1965, conduzida pelo administrador do programa espacial e de mísseis Dmitri F. Ustinov (1908-1984) com os projetistas chefes, Korolev propôs a eliminação de projetos lunares duplicados, como o de Chelomei. Ustinov, por outro lado, comparou os inúmeros sucessos feitos pelos americanos e os atrasos e falhas apresentadas nos projetos soviéticos. Ele atribuiu os problemas a uma clara falta de recursos para o programa e a uma duplicação de esforços entre os projetistas chefes. Esta conclusão ocasionou uma profunda reformulação em todo o programa e Korolev aproveitou a oportunidade para retomar o controle do programa lunar. Em 25 de outubro de 1965, Korolev assumiu o projeto para construção de um veículo tripulado para efetuar vôos circunlunares. O projeto LK-1 foi cancelado, mas não inteiramente. Em seu lugar, Korolev propôs a combinação do UR-500K, o estágio Bloco D e a Soyuz 7K-L1 este últimos projetados pelo seu próprio Bureau. O L-1 resultante foi autorizado nos decretos de 03 de agosto de 1964 e 25 de outubro de 1965. Os desenvolvimentos começaram em novembro de 1965. Apesar da vitória de Korolev, seu outro projeto, o N1-L3 tinha sérias limitações técnicas e problemas no cronograma. Korolev começou a admitir aos seus colegas que o pouso lunar não ocorreria antes de 1969.

Em 14 de janeiro de 1966, somente três meses após assumir o comando do projeto lunar, Korolev morreu em Moscou durante uma cirurgia no cólon. Ele manteve a doença em segredo e sua morte, aos 56 anos, foi uma surpresa para todos. Apesar da morte de Korolev, durante 1966, a nave 7K-L1 foi completada. Em fevereiro de 1967, o governo aprovou um programa integrado L1/L3

indicando que a primeira missão circunlunar deveria ocorrer em junho de 1967.

O L-3 aprovado difere do concebido inicialmente por Korolev. Este programa previa o lançamento de dois tripulantes a Lua, lançados em um único N1, e o pouso na superfície de apenas um cosmonauta no equivalente soviético do *Lunar Module* (Apollo LM) estadunidense, a LK (*Lunny Korabl* - Nave Lunar). A LK, projetada por Mikhail K. Yangel (1911-1971), foi testada em três voos, com absoluto sucesso, entre 24 de novembro de 1970 e 12 de agosto de 1971.

O L-1 foi testado em voo entre 10 de março de 1967 e 31 de outubro de 1970, em 13 missões. Rebatizada de Zond, a L-1 realizou sete circunavegações lunares não-tripuladas, das quais a primeira nesta categoria de voo e seis com o recolhimento da cápsula. Entretanto, até a circunavegação lunar tripulada, efetuada pela Apollo-8 em 20 de janeiro de 1968, a Soyuz 7K-L1 não havia demonstrado que poderia ser segura para uso com cosmonautas. O programa foi cancelado e os órgãos de informação soviéticos começaram a disseminar a ideia de que a URSS nunca participou da corrida tripulada à Lua.

Apesar desta declaração, em 1981, na ocasião da queda do Cosmos 434, o terceiro teste de voo da LK, sobre o território da Austrália, a URSS comunicou ao povo daquele país que não havia o que se preocupar, pois se tratava apenas de uma cabine lunar experimental. Este foi primeiro reconhecimento oficial soviético da existência de um programa lunar tripulado mesmo que de forma inadvertida.

O trabalho de produção de novas unidades do veículo L3 foi cancelado em 01 de setembro de 1972 e o conjunto L3-N1 em 24 de junho de 1974, devido aos inúmeros sucessos norte-americanos na exploração lunar e, principalmente, devido às falhas no lançamento dos quatro protótipos do N-1. No segundo lançamento do N-1, em 03 de julho de 1969, o foguete de 105 m e 2735 toneladas caiu, em um ângulo de 45 graus, destruindo totalmente o complexo 110 leste do centro espacial de Baikonur (Cazaquistão). A reconstrução do complexo demorou 18 meses, marcando de maneira definitiva a perda da corrida tripulada à Lua pela URSS.

3 Razões para a falta de êxito soviético nas missões tripuladas à Lua

As causas para a perda da corrida espacial tripuladas foram sugeridas por diversos membros do programa espacial soviético [1]. Entre estes membros estava o engenheiro Vasiliy P. Mishin (1917-2001), o diretor do projeto lunar durante oito anos depois da morte de Korolev, foi demitido do cargo em 1974; o militar Nikolai P. Kamanin (1908-1982), comandante dos cosmonautas, dispensado em 1972; Boris Y. Chertok (1912-2011), projetista do OKB-1 e, pelo próprio Korolev antes de sua morte. Segundo estes membros as principais causas podem ser:

3.1 Problemas sistemáticos

- Inexistência de uma rede de administração exclusiva para a execução de programas espaciais civis;
- Falta de cooperação entre todas as organizações envolvidas no desenvolvimento e produção dos equipamentos do projeto – 500 organizações, pertencentes a 28 ministérios deveriam produzir equipamentos para o N-1, mas somente nove destas recebiam ordens diretas da Comissão Militar Industrial, órgão responsável pelo gerenciamento do projeto;
- Controle de qualidade deficiente – Não havia controle de qualidade disseminado nas fábricas que forneciam componentes ao projeto, muito menos trabalhadores qualificados. Kamanin acreditava que isso era um problema geral em todo o sistema industrial soviético;
- Estrutura planificada da economia soviética – O plano quinquenal não poderia ser modificado devido a problemas operacionais dos projetos envolvidos – Segundo Chertok, ninguém se candidatava a levar as más notícias às lideranças soviéticas.

3.2 Falta de suporte para o projeto

- Falta de consenso entre as autoridades soviéticas e os próprios projetistas chefes com relação a estratégia mais adequada para realização voos espaciais tripulados à Lua;

- Falta de financiamento adequado para o cumprir a meta de colocar cosmonautas na Lua num intervalo de tempo curto, como aquele estabelecido pelos Estados Unidos que seria o final da década de 1960.

4 Conclusões

A conquista espacial proporcionou à humanidade benefícios tecnológicos inegáveis como sistemas de telecomunicações globais, posicionamento geográfico e previsões ambientais mais exatas. Esta mesma tecnologia, infelizmente, também pode garantir a extinção de nossa espécie, em poucas horas, com o desencadear de uma guerra nuclear, onde o uso de ICBMs de ogivas múltiplas garantiriam a destruição de áreas com milhares de quilômetros quadrados.

A falta de êxito do programa lunar tripulado soviético é possivelmente decorrente de graves problemas como divergências internas entre os projetistas-chefes, falta de interesse dos governantes, a baixa eficiência da indústria, e recursos financeiros abaixo dos necessários para a concretização do programa em um cronograma curto, com aquele definido pelos Estados Unidos.

Agradecimentos

O autor agradece a um(a) revisor(a) anônimo(a) pelos pertinentes comentários e sugestões que impactaram positivamente no conteúdo deste manuscrito, e ao professor Amílcar Baiardi por propor a elaboração de um artigo na área de

ciência e tecnologia para avaliação de um curso de pós-graduação em Ensino, Filosofia e História da Ciência da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), ministrado em 2007. Este trabalho é fruto desta iniciativa.

Sobre o autor

Alberto Silva Betzler (betzler@ufrb.edu.br) é graduado em Astronomia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), com mestrado em Engenharia Elétrica e doutorado em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Atualmente, ele é professor na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), onde sua pesquisa se concentra em ciências planetárias, com enfoque em asteroides, cometas, meteoritos, planetas anões e exoplanetas.

Referências

- [1] M. Wade, *Encyclopedia Astronautica*. Disponível em <http://www.astronautix.com>, acesso em jan. 2024.
- [2] O. A. Sokolov, *Realized and Non-Realized Projects of the Soviet Manned Lunar Program*, AAS History Series **25**, 259 (2003).
- [3] P. Clark et al., *The Soviet Manned Lunar Program Revealed*, Quest: The History of Spaceflight Quarterly **1**(4), 16 (1992).

O mundo físico: Materialismo ou Idealismo? Um olhar desde as ciências

Jorge Ernesto Horvath

Universidade de São Paulo

Resumo

Apresentamos neste artigo uma discussão do velho problema da natureza do mundo natural. O Idealismo e o Materialismo são discutidos e contextualizados na Física Clássica e no mundo Quântico, mostrando que este último traz de volta velhas controvérsias num contexto novo. Poderemos estabelecer até que ponto a mente é responsável pela realidade física? Estas perguntas fundamentais podem servir como alicerce para uma discussão em sala de aula com interessantes desdobramentos interdisciplinares.

Abstract

We present in this article a discussion of the old problem of the nature of the physical world. The Idealist and Materialist positions are discussed and put in context in Classical Physics and the Quantum world, showing that the latter brings back old controversies within a new context. Can we ever establish to which extent the mind is responsible for the physical reality? These fundamental questions can serve as starting points for a discussion in the classroom with interesting interdisciplinary spinoffs.

Palavras-chave: materialismo, idealismo, filosofia das ciências, mecânica quântica.

Keywords: materialism, idealism, philosophy of science, quantum mechanics

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43425](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43425)

1 Introdução: Materialismo e Idealismo no Mundo Antigo

Há mais de 25 séculos algo extraordinário aconteceu na Jônia (região grega que corresponde ao atual litoral sul da Turquia). Por razões que são discutidas intensamente até hoje, uma série de pensadores de Clazômenas, Mileto, Éfeso e outras cidades prósperas tentaram pela primeira vez uma grande síntese do mundo natural (e também de aspectos humanos, que não nos interessam aqui) sem recorrer a causas sobrenaturais ou mágicas. Esta atitude racionalista contrasta com outras abordagens onde a fonte do conhecimento não é tão somente a razão humana, mas também e principalmente um conjunto de fatores e fatos que hoje chamaríamos com propriedade de “mitológicos”.

Com esses primeiros filósofos gregos existe a consideração do princípio gerador de todas as coisas como problema fundamental. O princípio procurado recebeu o nome de *arché* (em grego, ἀρχή), e foi a primeira tentativa de unificação do

mundo físico, já que tentava-se explicar todo o observado com uma única coisa. Diz-se que os filósofos das primeiras gerações eram monistas, em oposição à ideia imediatamente considerada de uma possível pluralidade de objetos fundamentais como constituintes de tudo. Coube tentar a identificação racional, puramente intelectual e especulativa, dessa *arché*, já que no mundo grego, e especialmente nos primórdios, não cabia a realização de experimentos. As observações gerais e diretas do mundo existente eram aceitas, mas não uma intervenção à procura de qualquer resposta, já que se entendia que isto distorceria os fatos [1].

Chegaram até nós alguns nomes importantes e suas posturas perante a natureza da *arché*. Para Tales de Mileto (“o primeiro filósofo”), a água era o elemento formador de tudo, possivelmente encorajado pela constatação da transformação em gelo e vapor. Seu discípulo Anaximandro, no entanto, discordou do seu mestre e postulou uma substância, ou *ápeiron*, de natureza quantitativamente infinita e qualitativamente indeterminada



Figura 1: Esquerda: Escultura com a figura de Anaximandro. Direita: o primeiro mapa do mundo conhecido, desenhado por Anaximandro.

que conteria os contrários tais como frio-calor e outros. A diversidade em cada substância resultaria da separação destas duas essências opostas, construindo assim o mundo observado. Anaximandro formulou ainda o primeiro modelo cosmológico conhecido, com uma Terra cilíndrica flutuando num espaço infinito, e desenhou o primeiro mapa da História (Fig. 1).

O último nome importante deste período é o de Anaxímenes de Mileto, quem manteve que o ar era o elemento primordial ou *arché*. A rarefação ou condensação do ar seriam os processos que permitiriam a formação dos objetos conhecidos, como as rochas. O elemento comum em estas propostas é o caráter material atribuído ao elemento primordial. Isto é até mais importante que o monismo, e tem como consequência direta que o mundo decorre da organização da matéria, o *arché*. Veremos a seguir como haveria pensamentos muito diferentes a respeito.

O primeiro filósofo importante que sugeriu outro princípio fundamental para o mundo foi Heráclito de Éfeso (535-475 a.C.), quem parece ter sido autodidata e prescindente de toda a obra dos filósofos anteriores a ele e de seus contemporâneos. Heráclito identificou a mudança como o elemento realmente fundamental. É conhecida sua afirmação a respeito da impossibilidade de tomar banho duas vezes no mesmo rio, que expressaria que tanto a correnteza quanto os fatos que acontecem na vida do homem provocam uma fluidez inevitável. Mas aparentemente esse assunto é bem mais interessante e útil: Heráclito afirma que a identidade das coisas decorre da sua constante mudança, sua metáfora é [2] “Naqueles que entram nos mesmos rios, sempre outras e outras águas fluem” (Tradução do autor do inglês). He-



Figura 2: Empédocles e os quatro elementos representados no século XV.

ráclito deu uma resposta para a questão da *arché* (presente nos fragmentos do Papiro de Derveni descoberto em 1962): afirmou que a *arché* é o logos, que para ele representa a ordem a racionalidade do Universo, colocando assim as leis acima da substância/matéria que o compõem.

Mas haveria outras visões contrastantes: Empédocles de Ácragas (atual Agrigento, 495-435 a.C.) quebrou esta postura monista e propôs a chamada teoria dos quatro elementos. Os quatro elementos comporiam os objetos reais em proporções variadas, dependendo da quantidade de ar, fogo, água e terra que os integrassem. Note-se que, embora abandonasse o monismo, a proposta de Empédocles é ainda claramente materialista. Todo o mundo estaria composto por frações de matéria (Fig. 2).

A doutrina dos quatro elementos gozou de muita popularidade por 2000 anos, já que foi adotada por Aristóteles e outros pensadores dominantes. Somente quando os trabalhos de John Dalton nos começos do século XIX mostraram que a hipótese atômica explicava fatos concretos observados em laboratório, foi que sua aceitação diminuiu e finalmente acabou. Mas para apreciar este processo precisaremos primeiro repassar as ideias da estrutura do mundo que foram surgindo e se opondo aos quatro elementos ao longo dos séculos.

Ainda no período pré-socrático uma das alternativas mais interessantes e de longo fôlego na história do pensamento é a formulação do atomismo por Leucipo e Demócrito no século IV a.C. O atomismo postula que os objetos do mundo físico são produto da combinação de pequenas unidades indestrutíveis (*ártozo*) que se movimentam num espaço vazio, este último uma novidade introduzida pelos atomistas para escapar dos paradoxos da impossibilidade do movimento que ti-

nham formulado os eleáticos. O atomismo foi elaborado e retomado muitas vezes na história, a primeira por Epicuro um século depois dos originais, por Lucrécio no século I a.C, pelo próprio Newton (chamado mais propriamente de corpuscularista), e começou a adotar a forma mais ou menos definitiva com Dalton, tudo isto antes da emergência da Física Quântica que trouxe novidades de importância para a constituição do mundo físico [3].

Embora não vamos embarcar numa discussão do atomismo como doutrina filosófica (vale lembrar de novo que não haveria nenhuma evidência em favor dos átomos até o século XIX), é importante enfatizar seu caráter fortemente materialista. “Todo é feito de átomos” ensinavam os atomistas, e até identificavam a alma humana com um tipo leve de átomo [4]. Podemos dizer que o *arché* atomista são os próprios átomos e o vazio no qual se movimentam.

Por outro lado, outra importante escola filosófica liderada por Pitágoras tinha chegado quase 5 séculos antes de Era Cristã a uma conclusão surpreendente. Os pitagóricos tinham forte interesse nas matemáticas e ficaram muito impressionados ao descobrir que havia relações matemáticas simples, por exemplo, entre os tons de uma corda vibrante [2]. Isto os levou a pensar que a essência do mundo é o número, ou seja, relações abstratas, não objetos físicos. Houve uma grande controvérsia ao redor da afirmação anterior, já que não era totalmente claro se os pitagóricos afirmaram que o mundo pode ser representado por números, ou se o mundo são os números, embora esta última versão parece verossímil. Vemos assim que a divergência em torno da natureza do mundo natural foi sempre muito forte e levou a posições antagônicas.

A figura fundamental da Filosofia do Mundo Antigo (e de todas as épocas) é o grego Platão. Sua própria visão do mundo difere substancialmente de todos os antecessores, com os quais estava em sério desacordo. Platão foi o criador da ideia de forma, acreditava que havia um mundo de ideias perfeitas (formas ou arquétipos platônicos), dos quais o nosso mundo é uma cópia imperfeita. O mundo “real” era para Platão, o mundo das ideias. Mas como Platão jamais afirma que os objetos em torno a nós são produto da mente, também difere das posições posteriores do Idea-



Figura 3: Platão e o mundo natural. Os sólidos regulares da imagem da direita foram tentativamente associados por ele aos quatro elementos de Empédocles, formando o mundo imperfeito no qual vivemos. Sem saber muito bem o que fazer com o dodecaedro, o atribuiu às constelações do céu. No entanto, as formas perfeitas do mundo real permaneceriam num plano diferente.

lismo (vide a seguir). Platão procurou associar os elementos fundamentais da realidade física aos sólidos regulares (ou platônicos), dando assim um novo cariz à doutrina dos elementos de Empédocles. O platonismo foi ofuscado por séculos em favor das doutrinas aristotélicas (as quais não acrescentaram muito ao problema da constituição do mundo físico), mas ressurgiu com força cada tanto, como poderemos apreciar nas seções seguintes.

É evidente que há inúmeras coisas que não foram incluídas aqui, mas temos agora a base para discutirmos a evolução das ideias a respeito do mundo natural para chegarmos depois à situação atual, nos começos do século XXI.

2 O debate durante o Iluminismo

Dar um “pulo” de quase 2000 anos é sem dúvida arriscado, já que houve um grande número de tentativas com sucessos e fracassos para estabelecer a natureza material ou mental do mundo, a maioria esquecidas no tempo. Mas com o chamado Iluminismo decorrente da Revolução Científica, no século XVII, o problema da realidade e a natureza dos objetos do mundo é seriamente considerado e debatido num contexto diferente, onde as evidências mais do que as doutrinas têm um papel fundamental. Porém são ainda os filósofos os que levam adiante o debate, começando com as ideias de John Locke (1632-1704), cuja posição a respeito da percepção e seu papel na formação da imagem do mundo e da consciência estimulou vários trabalhos posteriores. Nos seus trabalhos

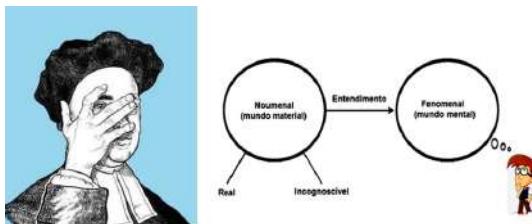


Figura 4: Esquerda: Berkeley praticando sua máxima “ser é ser percebido”. Direita: o esquema kantiano da realidade e suas manifestações, dentro do denominado Idealismo Transcendental.

Locke admite que existe um mundo exterior independente da mente, em uma espécie de acerto entre Aristóteles e Descartes, mas também afirma que como o conhecimento empírico tem sempre um grau de incerteza, sempre haverá aspectos do mundo que não poderão ser confirmados além de qualquer suspeita. Locke é considerado um pionheiro do Empirismo, corrente científica que propõe que todo conhecimento deriva da experiência e que ficou identificada principalmente com as Ilhas Britânicas.

Na sequência, o bispo George Berkeley (1685-1753) desenvolve as consequências do Empirismo de Locke até o fim. Berkeley considera evidente que, se todas as ideias são produto da percepção da mente, então o ser e o ser percebido são a mesma coisa, ou em latim: *Esse est percipi*. Esta posição converte logo os objetos do mundo físico em produtos da mente do observador, ou seja, funda um Idealismo radical com sérias consequências em potencial para as Ciências [5]. A primeira e principal é que converte a matéria em uma abstração desnecessária. Se para o atomismo a mente é produto da matéria, para Berkeley a matéria é produto da mente.

Não é nada fácil descartar o Idealismo de Berkeley definitivamente, embora leve a problemas sérios. Um deles é que a existência simultânea de todo o mundo físico exige a presença de algo como um Deus-observador, o qual resulta difícil de aceitar. Por outro lado, veremos que a moderna versão da Física do micro-mundo parece conter elementos idealistas que pareciam descartados, de tal forma que o Idealismo forma parte do debate da interpretação do mundo ainda hoje.

O último nome que contribui de forma decisiva para o campo idealista é o de Immanuel Kant (1724-1804). Kant deu várias contribuições im-

portantes para este problema nas suas obras, e o conjunto passou a ser denominado Idealismo Transcendental. Kant separa os objetos “em si” (*noumena*) das suas manifestações (*phenomena*) que a mente processa. Assim, limita o mundo material ao conhecimento das suas manifestações, já que é incognoscível em si próprio. Sua obra contém uma análise das categorias de pensamento que permitem organizar os fenômenos, expressadas sinteticamente assim:

“Espaço e tempo são estruturas dentro da qual a mente está restrita para construir sua experiência da realidade” Immanuel Kant, 1802

Kant analisa também a existência de juízos sintéticos e encontra que há coisas que produzem conhecimento a priori, sem intervenção de qualquer experiência empírica. Isto abre a possibilidade de conhecer ao menos uma fração da realidade sem experimentá-la diretamente, tendo como exemplo os resultados matemáticos.

A maturidade da Física Clássica atingida no século XIX deixou em boa medida para trás estas controvérsias, já que a maior parte dos Físicos adotou uma posição materialista-realista e muitos insistiram no Empirismo como conceito fundamental. Ernest Mach (1838-1916) considerava, por exemplo, o conceito kantiano de *noumena* como “perigoso”, porque introduzia elementos metafísicos que, segundo ele, eram inaceitáveis. Mas veremos que o debate ressurgiu um século depois para provocar uma profunda reflexão a respeito da realidade.

3 A Mecânica Quântica entra em cena

Enquanto a Física lidou com fenômenos à escala humana, a principal fonte de conhecimento empírico ficou restrita aos sentidos e experiências diretas. Embora houve uma progressiva matematização da descrição física, com o desenvolvimento dos conceitos mecânicos e térmicos que hoje resultam bem conhecidos, nunca foi difícil estabelecer o significado dos mesmos. Por exemplo, a ideia de “velocidade” sofreu poucos ajustes em séculos, e embora as teorias que envolvem a dinâmica de corpos fossem mudando, o faziam sem alterar ou questionar em extremo estas grandezas. Antes, a questão era a de estabelecer as leis que seguem e conferir sua validade. A atribui-

ção de significado concreto para as quantidades e grandezas principais e auxiliares numa teoria, no contexto da mesma, leva o nome de interpretação, isto é, dar sentido físico às quantidades matemáticas abstratas. Assim, e levando em conta que houve discussão em alguns casos pontuais, a Física Clássica não teve problemas sérios para achar interpretações, e em boa parte dos casos estas últimas foram imediatas ou quase.

Já nos começos do século XX a exploração do mundo do muito pequeno, começada por Rutherford e Thompson com as descobertas do núcleo atômico e o elétron respectivamente, apresentou um desafio maiúsculo para os físicos. A matéria em escala microscópica não se comportava como as bolas e pedras da Física Clássica. Isto levou ao primeiro modelo de Bohr, onde a estranha noção de quantização das energias dos elétrons no átomo foi introduzida, na sequência da hipótese de Max Planck em 1900 que introduziu a absorção e emissão de energia em “pacotes discretos” para resolver a chamada catástrofe do ultravioleta [6].

Se no princípio o modelo de Bohr era mais do que nada uma extensão semi-clássica das órbitas planetárias aplicada ao átomo, a aplicação para outros fenômenos microscópicos levou a questionamentos e desenvolvimentos que chacoalharam os alicerces das ciências físicas e até hoje o fazem. Vejamos os principais pontos da teoria e as consequências para a questão da realidade do mundo físico.

Em contraste com a Física Clássica, onde a medida das variáveis como posição e impulso pode ser melhorada sem limites, tanto com a utilização de aparelhos tecnologicamente superiores quanto pela repetição de muitas determinações para diminuir o erro, na Mecânica Quântica esta precisão tem um limite inferior absoluto. As variáveis como a posição x_0 e o momento linear de um objeto quântico p_0 (chamadas de conjugadas) não podem ser medidas simultaneamente com precisão arbitrária, já que o produto dos erros das duas variáveis é sempre maior que o quantum de ação $\hbar = h/2\pi$. Em termos das dispersões dessas variáveis temos

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar, \quad (1)$$

conhecida como relação de incerteza, uma das para cada direção espacial. Ou seja, um objeto quântico não pode ser localizado com grande precisão sem que seu momento adquira uma disper-

são cada vez maior, e vice-versa. A Natureza não permite reduzir o desvio padrão de x_0 e p_0 além de um valor mínimo. De forma análoga, a dispersão da energia E medida a um tempo t deve satisfazer

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar. \quad (2)$$

Estas relações, que limitam a precisão do conhecimento da dinâmica de elétrons e partículas microscópicas, levam a questionar a natureza das variáveis quânticas: as partículas não podem estar totalmente localizadas com momento finito, ou ter velocidade determinada: portanto, era necessária uma descrição diferente, para alguns evidentemente não determinística (no sentido de especificar variáveis probabilísticas e não clássicas) que admitisse esta novidade introduzida pelas relações de incerteza.

Os físicos mais jovens foram muito ousados na construção da teoria, tal como o próprio Heisenberg na discussão das relações eqs.(1) e (2). Heisenberg, inspirado na descrição das transições atômicas do átomo de hidrogênio, desenvolveu a chamada mecânica matricial, que permitia níveis de energia discretos nesse problema e era compatível com as relações de incerteza. Mas suas ideias não só inspiraram “repulsão” em Einstein e a velha guarda, também não conseguiram emplacar na comunidade simplesmente porque os físicos não dominavam o cálculo matricial e estranharam do formalismo [7].

A tentativa de Erwin Schrödinger (1887-1961) teve mais sucesso, principalmente porque utilizou ferramentas muito mais palatáveis para exprimir a descrição almejada. Schrödinger formula a dinâmica quântica em termos de uma função de onda Ψ (cujo nome já é um problema...) que satisfaça a equação

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + (E - V)\Psi = 0. \quad (3)$$

À qual chegou depois de estudar a quantização de um problema de autovalores [3] partindo da ação da Mecânica Clássica. Mas os elementos quânticos não tão somente se limitaram a isto, também precisou incorporar a relação de Louis de Broglie ($\lambda = h/p$) que atribui propriedades ondulatórias às partículas de impulso p , que se põe de manifesto na difração de elétrons e que é normalmente conhecida como dualidade. Temos aqui uma série de problemas a serem resolvidos:

o primeiro é que a função de onda não satisfaz uma equação de onda. A eq.(3) é uma equação de difusão, com tempo imaginário, mas isto foi minimizado pelo fato que Schrödinger formulou uma equação não-relativística, enquanto as ondas são intrinsecamente relativísticas (invariantes de Lorentz). Porém, não houve como dar um significado direto para a função de onda Ψ : em geral, ela tem uma componente imaginária, o qual mostrava que não poderia ser uma onda “real”. Em soma, a confusão foi grande desde o princípio e demoraria a ser resolvida.

Além das dificuldades flagrantes com Ψ , o caráter probabilístico que paira na descrição contido nas relações de incerteza levaram a Max Born (1882-1970) a procurar uma interpretação para a função de onda que, desde sua publicação, ficou fixa como a ortodoxia pela aceitação do grupo de Copenhagen. Born postulou que o quadrado da função de onda representava a probabilidade de achar a partícula descrita numa região do espaço (x_1, x_2) para um dado tempo, isto é

$$P(x) = \int_{x_1}^{x_2} |\Psi(x)|^2 dx. \quad (4)$$

Assim, o quadrado eliminava o potencial da indesejável parte imaginária de Ψ , e as relações de incerteza eram totalmente incorporadas. A variável Ψ foi assim identificada com uma onda de probabilidade. Mas isto não foi satisfatório nem para Einstein, nem para o próprio Schrödinger. Eles e outros reagiram muito mal ao caráter probabilístico como característica dos objetos quânticos.

A crítica principal estava dirigida à impossibilidade de descrever com acurácia um fenômeno microscópico, tendo que se contentar com um conjunto de probabilidades decorrentes da interpretação de Born construídas com as funções de onda solução da eq.(3). Além de Schrödinger e Einstein, o personagem central do lado dos inovadores foi o dinamarquês Niels Bohr (1885-1962). Bohr assumiu o papel de porta-voz e mentor da nova teoria, discutindo com Heisenberg, Pauli e toda a nova geração o significado e cada ponto obscuro e foi o antagonista principal dos “realistas” que a questionavam. Seus embates e discussões públicas e particulares com Einstein ficaram na História. Vejamos o porquê desta controvérsia no seu cerne, já que terá muito a ver com a questão que motiva este artigo.

Certamente a Mecânica Quântica está longe de ser intuitiva, e resulta absurda se olhada com um viés tradicional. A objeção mais séria em contra da Mecânica Quântica formulada por Einstein e Schrödinger e de Broglie entre outros, dizia que um resultado probabilístico não é o que a Física deveria oferecer, mas antes uma verdadeira descrição da Realidade, ou seja, dos objetos quânticos devia ser desenvolvida. Embora aceitaram o sucesso da Mecânica Quântica, afirmaram que a teoria deveria estar incompleta, e esperavam que ela fosse substituída por uma teoria mais fundamental, da qual ela emergiria como uma versão estatística muito geral. Este grupo esperava restaurar a situação em que os quanta poderiam ser descritos como entidades reais com propriedades definidas o tempo todo.

Um exemplo notável de experimento mental que põe de manifesto os questionamentos é o do chamado gato de Schrödinger. A situação exposta por Schrödinger é a de uma caixa com um vidro de veneno acionado aleatoriamente por um decaimento radioativo. Um gato é colocado na caixa e, depois de certo tempo, abre-se para ver se foi ou não envenenado e morto. A questão é que, segundo a Mecânica Quântica, o estado do gato é descrito como uma mistura dos estados “vivo” e “morto” antes de abrir a caixa. Sua função de onda é

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|vivo\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|morto\rangle, \quad (5)$$

onde os coeficientes resultam da normalização da probabilidade. Agora bem, Schrödinger explicitamente coloca um gato, bicho macroscópico e familiar, para mostrar que a descrição quântica que diz que o gato está vivo e morto ao mesmo tempo é absurda. Não podemos simplesmente dizer que não sabemos se está vivo ou morto, mas que realmente está em um dos dois estados, já que isto é incompatível com a teoria quântica. Não vale aplicar as probabilidades clássicas e extrapolar, porque isto seria inconsistente com a nova teoria. Agora vemos em toda sua extensão por que a descrição quântica espantava os físicos: falar de um elétron e não de um gato faria a eq.(5) passar como aceita, substituindo $|vivo\rangle$ e $|morto\rangle$ por $|\uparrow\rangle$ e $|\downarrow\rangle$ dos estados de spin, por exemplo. Isto último não espantaria ninguém, embora o cerne do problema é exatamente o mesmo.

Procura-se Vivo e Morto



Figura 5: O gato de Schrödinger e seu trágico destino: há uma probabilidade P de ficar vivo e uma probabilidade $(1 - P)$ de estar morto quando a caixa for aberta, mas o importante é que ele precisou estar vivo e morto antes da caixa ser aberta segundo a Mecânica Quântica. Os estados “vivo” e “morto” estão misturados antes da abertura, e colapsam para um deles quando a medida é efetivada. Schrödinger imaginou esta situação com algo bem conhecido e macroscópico (o gato) para mostrar que a interpretação ortodoxa de Copenhagen é absurda, já que ninguém se espanta se a mesma coisa acontece com elétron com *spin up* e *down*, como se não fosse um grande problema.

Os ataques e questionamentos dos “realistas” provocaram que as versões posteriores da Mecânica Quântica fossem ainda mais radicais, ainda mais afastadas da Física Clássica e sua Filosofia. Por exemplo, em 1929 Bohr afirmava que a Mecânica Quântica não versava sobre a Realidade, mas sim sobre o que pode ser dito sobre a Realidade [8]. Pior ainda, esta última Realidade foi uns anos mais tarde por ele negada, no sentido de que o formalismo da Mecânica Quântica não descreve nenhuma “Realidade quântica profunda”, negando-lhe à teoria qualquer caráter ontológico, e reduzindo-a a tarefa do estudo e previsão de fenômenos. Isto último é o oposto que afirmavam Einstein e outros, que a Física devia ser uma descrição de um mundo real, não um mero instrumento de cálculo. Por último, segundo a escola de Copenhagen, toda a definição das propriedades de um sistema acontecem no ato da medida, quando de todos os possíveis estados com probabilidades calculáveis, a medida força a definição de um deles por meio do chamado colapso

da função de onda. Isto pode ser considerado misticismo puro: não há na Mecânica Quântica nenhuma menção de como isto acontece, não existe nenhuma indicação de como calcular este colapso, e realmente parece com um ato de mágica. Mais ainda, físicos muito gabaritados como o Prêmio Nobel húngaro Eugene Wigner (1902-1995) chegaram à conclusão que o colapso se produz na mente do observador. Desta forma, a porta para um Idealismo subjacente ficou aberta. E para piorar de vez, como os objetos macroscópicos estão evidentemente compostos de objetos quânticos, devemos aceitar uma ontologia inconsistente: se os micro não têm existência até ser medidos, por que existem os macro? [9].

Uma das tentativas pontuais mais famosas de arguir em favor de um caráter realistados objetos físicos, provando que a Mecânica Quântica era falsa ou incompleta, é o trabalho de Einstein, Podolsky e Rosen [10]. Os três imaginam um experimento que faria possível trazer o que eles chamaram de “elementos da realidade” para alcançar uma descrição completa da Natureza. De fato, um ingrediente importante do argumento do experimento de EPR era a localidade da Realidade, esta última vista como uma propriedade geral da descrição do mundo. A proposta consistia em considerar um par de partículas em estados inicialmente correlacionados. Desta forma, medir a primeira partícula permitia predizer o resultado da segunda. Isto seria feito quando as duas partículas estivessem a uma distância suficientemente grande, de tal forma que a comunicação causal entre elas fosse impossível. Da medida da primeira partícula, eles deduziam que a variável de interesse da sua companheira podia ser conhecida com certeza sem mesmo ter sido medida, contrariando a descrição da Mecânica Quântica. Este trabalho [10] apareceu junto com uma réplica de Bohr na mesma edição dizendo que a interpretação de EPR não atingia realmente os postulados das variáveis complementares e que a Mecânica Quântica não resultava incompleta como argumentado. Mas Einstein posteriormente focou sua atenção na aparente ausência de causalidade, que seria necessária para que a correlação se mantivesse, e insistiu na construção de uma quântica dentro da classe de teorias construídas com variáveis ocultas locais [11], quantidades ainda desconhecidas que devem ser introduzidas para trazer

a Mecânica Quântica para o reino do que Einstein e outros considerassem aceitável, o realismo local. Mas, de alguma forma, o tiro de Einstein saiu pela culatra...

Esta última afirmação decorre da constatação conseguida, depois de poucas décadas, da realização de experimentos reais do tipo proposto por EPR. Utilizaram-se fótons, elétrons em estado de spin total zero que viajaram em direções opostas e outros sistemas. Sempre foi a Mecânica Quântica a que levou à predição correta, sem importar a distância entre as partículas ao momento da medida. Uma última versão no espaço da mesma ideia foi publicada em 2017 por um grupo chinês que utilizou o satélite Micius para transmitir os pares de fótons “emaranhados” para duas estações em terra separadas por 1200 km. De novo, a chegada quase simultânea dos fótons em cada estação e a medida de um deles não estragou a correlação misteriosa (no sentido de Einstein): os fótons não se comunicam, mas formam um conjunto que não pode ser isolado. Assim, a objeção de Einstein contra a causalidade, na verdade, é a constatação que os objetos quânticos têm um caráter não-local, decorrente do chamado embaralhamento das fases das funções de onda.

Esta última afirmação decorre da constatação conseguida, depois de poucas décadas, da realização de experimentos reais do tipo proposto por EPR. Utilizaram-se fótons, elétrons em estado de spin total zero que viajaram em direções opostas e outros sistemas. Sempre foi a Mecânica Quântica a que levou à predição correta, sem importar a distância entre as partículas ao momento da medida. Uma última versão no espaço da mesma ideia foi publicada em 2017 por um grupo chinês que utilizou o satélite Micius para transmitir os pares de fótons “emaranhados” para duas estações em terra separadas por 1200 km. De novo, a chegada quase simultânea dos fótons em cada estação e a medida de um deles não estragou a correlação misteriosa (no sentido de Einstein): os fótons não se comunicam, mas formam um conjunto que não pode ser isolado. Assim, a objeção de Einstein contra a causalidade, na verdade, é a constatação que os objetos quânticos têm um caráter não-local, decorrente do chamado embaralhamento das fases das funções de onda.

Em suma, a Mecânica Quântica prediz correlações de alcance infinito (que não decaem com

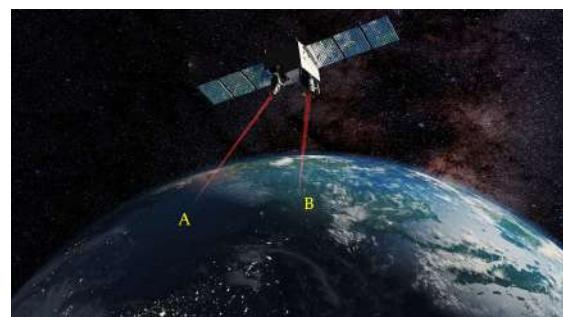


Figura 6: O embaralhamento de fases sendo testado pelo satélite chinês Micius no espaço [12]. As estações A e B estavam separadas por mais de 1200 km, no entanto, os fótons que chegaram conservaram a correlação.

a distância), verificadas em experimentos terrestres e espaciais. O mundo microscópico parece ser não local contrariando Einstein. Esta estranha propriedade está ligada à descrição quântica probabilística, já que as fases embaralhadas da função de onda não se independizam nunca.

4 Onde estamos hoje?

Chegando ao final do artigo cabe retomar a questão de fundo e reconsiderar o que aprendemos da realidade do mundo físico. Duas posturas encontradas coexistem, o Materialismo, que faz a mente, a consciência e tudo mais um produto da matéria organizada; e o Idealismo que diz o oposto: a mente cria o mundo e seus objetos. Embora possamos descartar as versões mais simples do Idealismo e do Materialismo, não podemos hoje taxativamente nos inclinar por nenhuma numa análise a fundo.

Enquanto o debate se manteve no plano filosófico “puro” até o último século, a construção da Mecânica Quântica como necessidade alternativa ao mundo Clássico que não consegue lidar com a microfísica trouxe questionamentos concretos à realidade materialista, já que embora não podemos afirmar que é uma teoria Idealista, pelo menos traz elementos que a deslocam nessa direção. Isto é particularmente verdadeiro na formulação tardia, vista por alguns como um apanhado místico inconsistente (mas que funciona, sem que saibamos exatamente como, Bunge [13]). Os físicos não são muito chegados em questionamentos fundamentais, desde que estão em posse uma ferramenta comprovada que produziu resultados

corretos cada vez que foi aplicada em quase um século. Mas isto não diminui nem um pouco o sabor agriadoce que esta situação produz para quem a estuda a fundo [14, 15]. Ou nos dedicamos a resolver os paradoxos ou ficaremos sempre na dúvida a respeito da natureza do que nos rodeia.

Como sugestão final, este tema é muito atrativo e formativo para os estudantes. Muito mais que os exercícios formais do movimento, termometria e demais assuntos da Física. Reservar um tempo curto para exposição e debate na sala de aula, começando, por exemplo, por uma leitura aprofundada das Refs. [2] e [3] seria muito formativo, fora das práticas normais que os estudantes conhecem e detestam, e os confrontaria com um verdadeiro problema de enormes dimensões, ao qual gerações de pensadores dedicaram seus melhores esforços. Longe de se tratar de um tecnicismo para passar no Vestibular, estaria recuperando a essência da Educação perdida há tempos, e os aproximando da Academia de Platão em Atenas nos primórdios do pensamento Ocidental. Achamos que vale muito a pena.

Sobre o autor

Jorge Ernesto Horvath (foton@iag.usp.br), Professor Titular no IAG-USP é graduado em Física (1985), Doutor em Ciências em 1989 na Universidad Nacional de La Plata (Argentina) e Livre-Docente pela USP em 1997. Autor de pesquisas em Astrofísica Relativística, Altas Energias e Cosmologia, além de vários livros no Brasil e no exterior para os diferentes níveis de Educação. Pesquisador Nível I do CNPq e visitante na Universityof Arizona (1998-1999). Fundador e Editor da Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA) desde 2003. Coordenou de 2011 até 2021 o Núcleo de Pesquisas em Astrobiologia da USP.

Referências

- [1] D. C. Lindberg, *Los Inicios De La Ciencia Occidental* (Paidos, 2002).
- [2] J. E. Horvath et al., *A Natureza do mundo físico: do que é feito o Universo? Volume 1 – Dos pré-Socráticos a Revolução Científica* (Livraria da Física, São Paulo, 2023).
- [3] J. E. Horvath et al., *A Natureza do mundo físico: do que é feito o Universo? Volume 2 – Do Iluminismo a Ciência Contemporânea* (Livraria da Física, São Paulo, 2023).
- [4] B. Russel, *História do pensamento ocidental* (Ediouro, Rio de janeiro, 2001).
- [5] B. Duignan, *George Berkeley*, in *Encyclopaedia Britannica* (2024). Disponível em <https://www.britannica.com/biography/George-Berkeley>, acesso em fev. 2024.
- [6] J. E. Horvath, *As estrelas na sala de aula* (Livraria da Física, São Paulo, 2019).
- [7] M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (McGraw-Hill, New York City, 1966).
- [8] A. Petersen, *The Philosophy of Niels Bohr*, *Bulletin of the Atomic Scientists* **19**(7), 8 (1963).
- [9] J. E. Horvath, R. R. Fernandes e T. E. Idiart, *On the ontological ambiguity of physics facing reality*, *Astronomische Nachrichten* **344**(1-2) (2023).
- [10] A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, *Physical Review* **47**(10), 777 (1935).
- [11] D. Bohm, *Wholeness and the Implicate Order* (Routledge, Oxfordshire, 1980).
- [12] J.-G. Ren et al., *Ground-to-satellite quantum teleportation*, *Nature* **549**(70-73) (2017). [ArXiv:1707.00934](https://arxiv.org/abs/1707.00934).
- [13] M. Bunge, *Física e Filosofia* (Perspectiva, São Paulo, 2007).
- [14] L. de la Peña, *Introducción a la Mecánica Cuántica* (Ediciones Científicas Universitarias, México, 2010).
- [15] N. Pinto-Neto, *Teorias e interpretações da mecânica quântica* (Livraria da Física, São Paulo, 2023).

Sobre Amoroso Costa: uma conversa com Arthur Gerhardt Santos

Júlio C. Fabris e Luiz Filipe Guimarães

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Amoroso Costa foi um matemático brasileiro, falecido tragicamente em dezembro de 1928, em um acidente de avião no que seria uma homenagem a Alberto Santos Dumont quando do seu retorno ao Brasil. Ele se dedicou a estudos sobre Relatividade Geral, Geometrias não-euclidianas, Teorias de números e combateu o positivismo, doutrina predominante no Brasil Republicano do início do século XX. Arthur Gerhardt Santos, governador do Espírito Santo no início da década de 1970, se dedicou a estudar a vida e a obra deste importante pioneiro da ciência no Brasil. Este texto reproduz os elementos essenciais de uma conversa com Gerhardt Santos sobre Amoroso Costa. Foi uma ocasião para falar de vários outros assuntos paralelos como o positivismo, a ciência e a educação no Brasil.

Abstract

Amoroso Costa was a Brazilian mathematician, who tragically died in December 1928 in a plane crash, when they were planning a tribute to Santos Dumont upon his return to Brazil. He dedicated himself to studies on General Relativity, non-Euclidean Geometries, Theories of Numbers, and fought positivism, a predominant doctrine in Republican Brazil at the beginning of the 20th century. Arthur Gerhardt Santos, governor of Espírito Santo in the early 1970s, dedicated himself to studying the life and work of this important pioneer of Science in Brazil. This text reproduces a conversation with Gerhardt Santos about Amoroso Costa. It was an opportunity to talk about several other parallel issues such as positivism, science and education in Brazil.

Palavras-chave: Amoroso Costa, relatividade geral, geometrias não-euclidianas, positivismo.

Keywords: Amoroso Costa, general relativity, non-Euclidean geometries, positivism.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43534](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43534)

1 Introdução

Em uma conversa no Observatório Nacional, Rio de Janeiro, há mais de 20 anos atrás, o então pesquisador daquela instituição, Nilton Santos, abordou o nome de Amoroso Costa, brilhante matemático (ou físico-matemático, se preferirem) que morreu tragicamente em 1928, com 43 anos de idade, em circunstâncias que serão descritas mais abaixo. Antes do seu desaparecimento prematuro, Amoroso Costa tinha assinado algumas das mais importantes páginas da incipiente ciência brasileira e protagonizado uma luta árdua contra o positivismo, corrente filosófica de origem francesa que então imperava nos círculos oficiais da jovem república brasileira. Nico, como era familiarmente chamado Nilton Santos, falou da necessidade de conhecer mais sobre esse importante

personagem da ciência brasileira e mostrou um livro contendo escritos sobre matemática e física de Amoroso Costa [1]. A Introdução ao texto era dividido em três partes, assinadas respectivamente por Arthur Gerhardt Santos, Lélio Gama e Antonio Paim. Nico ficou surpreso ao saber que Arthur Gerhardt Santos tinha sido governador do ES entre 1971 e 1975, e prometemos tentar conseguir mais informações, com o próprio Artur Gerhardt Santos, sobre Amoroso Costa.

O encontro com o ex-governador não ocorreu imediatamente, mas finalmente, por volta de 2004, ele aceitou gentilmente vir à UFES para uma conversa, que ocorreu na sala de trabalho dos profs. Antônio Brasil Batista e José Plínio Baptista, fundadores do Grupo de Pesquisa em Cosmologia e Gravitação da UFES. A conversa fluiu de forma bastante agradável e instrutiva, e



Figura 1: Arthur Gerhardt Santos (jan. 2024).

terminou com uma confissão de Artur Gerhardt Santos:

Minha intenção era escrever a biografia de Amoroso Costa, mas ao assumir a governadoria do ES, acabei me envolvendo em uma sequência de obrigações e compromissos que comprometeram este projeto, o que até hoje lamento muito.

Infelizmente, naquela oportunidade, não registramos a conversa com o ex-governador do ES. Formado na Escola de Engenharia, instituição sediada no Rio de Janeiro, e que fora a mesma em que tinha atuado Amoroso Costa, Arthur Gerhardt Santos é um apaixonado por ciência (e por música e cinema, entre outras artes), com um especial interesse em Matemática. Daí seu interesse pelo então pouco conhecido matemático (e físico) Amoroso Costa.

Arthur Gerhardt Santos (Figura 1), hoje com 95 anos de idade, completados em 6 de outubro de 2023, nos recebeu para uma conversa sobre Amoroso Costa. Na oportunidade, outros temas ligados à história da ciência e à educação vieram à tona. O interesse pelas ciências e pelas artes continua intenso para o nosso interlocutor.

No que segue, apresentaremos um resumo desta conversa, incluindo comentários que permitirão (esperamos) ao leitor ter uma dimensão da importância de Amoroso Costa e da necessidade de difundir sua atuação e contribuição para a ciência no país. Começaremos por um breve relato sobre ele. Apresentaremos ao final, em um apêndice, a reprodução do artigo que ele publicou em *O Jornal*, em 1919, sobre os resultados das medidas feitas sobre a deflexão da luz durante o eclipse em Sobral.



Figura 2: Amoroso Costa (13/01/1885 — 03/12/1928).

2 Amoroso Costa, cientista, educador e divulgador da ciência

No livro citado na Introdução, *As ideias fundamentais da matemática e outros ensaios* [1], Arthur Gerhardt Santos escreveu, à guisa de apresentação, o que ele denominou “Apontamentos para a biografia de Amoroso Costa”, que seria, conforme ele mesmo diz, a primeira etapa para a biografia mais completa que ele planejava do físico e matemático. Manoel Amoroso Costa (Figura 2) nasceu em 13 de janeiro de 1885 no Rio de Janeiro. Viria a falecer em 3 de dezembro de 1928, em uma circunstância que deveria ser festiva e que se revelou trágica. Nesta data, um navio deveria entrar na baía de Guanabara trazendo de volta ao Brasil Santos Dumont, o ilustre brasileiro que fez decolar os primeiros protótipos de avião. Amoroso Costa, na companhia de três outros matemáticos da Escola Politécnica, sediada no Rio de Janeiro, alugaram um pequeno avião que deveria realizar voos sobre o navio, como uma homenagem àquele que fez voar “o mais pesado

que o ar”.

Em uma fatalidade, o avião caiu no mar, matando todos os seus ocupantes. A ciência no Brasil sofrera um importante revés. Além de Amoroso Costa, estavam no avião acidentado outros notáveis matemáticos e cientistas brasileiros da época. Entre eles, Tobias Moscoso, Ferdinando Labouriau Filho e um estudante, Frederico de Oliveira Coutinho.

Amoroso Costa estava ativamente envolvido na geração de novos conhecimentos científicos: publicou artigos nos *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (que ele, aliás, ajudou fundar, junto com outros importantes nomes da ciência brasileira, como Henrique Morize) e nos *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, na época uma das mais importantes revistas científicas no mundo. Colaborava diretamente com eminentes cientistas, como o francês Émile Borel, e se interessava tanto pela Matemática pura quanto pela Física. Em particular, Amoroso Costa demonstrava interesse pela teoria de números, em especial números e geometrias não-arquimedianas.

Geometrias não arquimedianas violam o teorema de Arquimedes, que estabelece que, dados dois números x e y , existe um número natural n tal que $nx > y$. Isto permite ordenar os números. Ao violar esta condição estruturas geométricas muito diferentes das euclidianas aparecem. E Amoroso Costa era particularmente interessado em geometrias não-euclidianas, que estão na base da teoria da relatividade geral, formulada em 1915, e da qual Amoroso Costa foi um grande entusiasta.

Em 1922, Amoroso Costa publicaria sua *Introdução à Teoria da Relatividade* [2]. Foi um dos primeiros livros escritos no mundo sobre a nova teoria da gravitação, formulada por Albert Einstein, ao qual podemos acrescentar, pelo menos o nome de David Hilbert, um dos mais importantes matemáticos do século XX. O livro foi esmiuçado em detalhe na Ref. [3], onde se ressalta a limpidez, rigor e transparência desse texto de aproximadamente 100 páginas. Como mencionado na supracitada referência, o livro constitui ainda hoje, 100 anos depois, uma introdução à teoria da relatividade que pode ser dado a um estudante que queira conhecer a teoria em seus fundamentos físicos e matemáticos. Não identificamos nenhum erro ou má interpretação da te-

oria no texto. Ao contrário, seus fundamentos são expostos de forma transparante e elegante. As equações da relatividade geral, por exemplo, são deduzidas usando princípio variacional, e a invariância pelo grupo de difeomorfismos gerais é enfatizada, em uma linguagem ainda atual.

Uma anedota diz que perguntaram a Arthur Eddington, um dos maiores astrônomos do século XX, autor também de um notável livro sobre a relatividade geral [4], se era verdade que havia apenas três pessoas no mundo que comprehendiam a teoria da relatividade geral. Ele retrucou: “Quem é o terceiro?” Os dois primeiros seriam obviamente Einstein e ele próprio. Se conhecesse Amoroso Costa, talvez Eddington tivesse dado outra resposta. É um fato que poucas pessoas no mundo comprehendiam, naquela época, a teoria da relatividade geral. Entre os motivos estava o uso de uma linguagem matemática pouco usual entre os físicos, envolvendo geometrias não euclidianas, geometria diferencial, etc. Seguramente, Amoroso Costa estava entre os poucos cientistas capazes de abordar essa sofisticada teoria gravitacional.

Amoroso Costa era também empenhado no que se chama atualmente, divulgação científica. Ele escrevia sobre assuntos científicos em jornais e revistas destinados ao público em geral. Assim, em novembro de 1919 ele publica em o *O Jornal*, um dos principais diários da época, um artigo sobre os resultados das medidas realizadas pela expedição científica em Sobral (organizada por Eddington, mas com a participação do então diretor do Observatório Nacional, Henrique Morize) para observar o eclipse total do Sol ocorrido em 29 de maio daquele ano, e onde uma das mais notáveis predições da relatividade geral: a deflexão da luz por corpos massivos. A análise das medidas feitas foi concluída em novembro de 1919, confirmando, dentro dos limites de erros das medidas feitas, as previsões da teoria da relatividade geral. Assim que os resultados foram tornados públicos, através de telegrama enviado às sociedades científicas espalhadas no mundo, Amoroso Costa descreve neste artigo em *O Jornal* o conteúdo e significado deste marco da ciência contemporânea, que teve o Brasil como palco.

Ele também se preocupava com a sedimentação das atividades científicas, participando da fundação da Academia Brasileira de Ciências junto

com, entre outros, Henrique Morize, e da Associação Brasileira de Educação, da qual participou Anísio Teixeira, tendo presidido esta instituição.

3 O interesse pelo legado de Amoroso Costa

Artur Gerhardt se mudou para o Rio de Janeiro ainda adolescente, durante a década de 40. Foi estudar no Colégio Andrews, um dos mais reputados da então capital federal. Nesta época, era muito comum que aqueles que procuravam uma boa formação, e que podiam arcar com a vida em uma cidade maior, saíssem do Espírito Santo. Junto de Artur Gerhardt, outros 9 de seus conhecidos foram para o Rio de Janeiro cursar Engenharia e outros cursos.

Tal observação gera, na sequência, uma reflexão sobre suas ações como governador. Uma delas, que foi (e continua sendo) polêmica: atrair para o ES os chamados Grandes Projetos, com a indústria siderúrgica, de celulose, entre outras, que deram um caráter industrial à economia capixaba.

Arthur Gehardt diz que visitou muitas escolas do ES quando esteve à frente da Governadoria. Ele acrescenta que algo que lamenta do período que foi governador do ES é não ter visitado mais escolas, conversado com mais professores. No entanto, Gerhardt durante seu governo atuava para deixar que a própria comunidade escolar definisse o que seria feito para melhorar as condições existentes e como o dinheiro seria usado. “O colégio não é do Estado, é de vocês”, dizia ele na época. Quando mais tarde foi implementado o projeto das Escolas Polivalentes, Gerhardt fez questão que seus filhos fossem nelas estudar. Era um projeto que visava dotar o Espírito Santo de Escolas Públicas de Excelência.

Terminado o que era então denominado de Curso Científico (equivalente, em linhas gerais, ao atual Ensino Médio), Arthur Gerhardt ingressou na Escola de Engenharia. Era a mesma instituição onde atuou Amoroso Costa, como educador e pesquisador. Naquela época, havia ainda a memória da sua passagem pela instituição.

Era natural, portanto, que, apaixonado pelas ciências matemáticas e físicas, Gerhardt se interessasse por aquele que tinha lecionado na Es-

cola de Engenharia. Na época, a Escola de Engenharia ficava no centro do Rio, no Largo de São Francisco. Depois, com a estruturação da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), ela foi transferida para a Ilha do Fundão.

Aproximadamente nessa mesma época ele trouxe contato com duas outras pessoas marcantes na ciência e cultura brasileiras. O primeiro foi Lélio Gama, matemático, que viria pouco tempo depois fundar o Instituto de Matemática Pura e Aplicada, o IMPA, hoje com sede no Jardim Botânico, RJ, instituição de renome internacional, que tem no seus quadros o pesquisador Artur Ávila, único brasileiro até agora a ganhar a Medalha Fields, distinção que em Matemática equivale ao Prêmio Nobel. O segundo seria Antônio Paim, historiador e filósofo, falecido em 2021, aos 92 anos de idade. Lélio Gama e Antônio Paim participariam da redação da Introdução à coletânea de textos de Amoroso Costa, que eles mesmo tinham organizado.

4 O baú de Amoroso Costa

A organização do livro *As ideias fundamentais da matemática e outros ensaios* começa a se esboçar mais tarde, na década de 60, e tem sua origem no interesse principalmente de Antônio Paim, Lélio Gama e Arthur Gerhardt por Amoroso Costa, como também de um episódio mais fortuito. Paim acabou descobrindo que a viúva de Amoroso Costa era viva. Amoroso Costa tinha se casado com Zaira Amoroso Costa, irmã de Alceu Amoroso Lima, que Arthur Gerhard chama pelo seu pseudônimo jornalístico, Thistão de Athayde. Alceu Amoroso Lima foi um destacado crítico literário e pensador católico, que deixou um imenso legado de crítica literária. Ele era primo de Amoroso Costa.

Zaira Amoroso Costa não voltaria a se casar e, quando Paim e Gerhardt a procuraram, ela vivia com sua nora, Maria Helena Amoroso Costa, também viúva. As duas guardavam ciosamente os papéis de Amoroso Costa em um baú. Entre estes papéis haviam vários rascunhos de textos e artigos nunca publicados.

Amoroso Costa era muito organizado e cuidadoso. Seus manuscritos, e outros documentos, estavam bem organizados. Gerhardt e Paim, en-

tão, fizeram um trabalho de “garimpagem” para selecionar os textos que deveriam dar origem ao livro [1]. Infelizmente, como Gerhardt lamenta, não foi possível localizar um curso sobre geometrias não-euclidianas, mencionado em vários lugares, sendo possível apenas identificar algumas folhas manuscritas. À pergunta sobre o destino atual deste acervo, Arthur Gerhardt lamenta desconhecer.

Eu não sei. Falei com o Paim que respondeu: “Arthur, a viúva (Zaira) já morreu e a nora (Maria Helena) também já morreu.” Eu fiquei arrependido de não ter trazido o baú para Vitória.

Mesmo assim, o livro reunindo diversos escritos de Amoroso Costa veio à luz. Alguns deles tinham sido previamente publicados em revistas (inclusive científicas) e jornais, outros eram inéditos. Esta publicação foi precedida de várias ações para reunir os textos de Amoroso Costa, o que implicava procurar várias fontes que pudessem dar pistas sobre o legado científico e educacional do Físico-Matemático. Isto acabou repercutindo. Arthur Gerhardt conta um episódio curioso que disto resultou, quando estava para assumir o cargo de governador do ES. Marcos Viana, também capixaba e na época presidente do BNDES, lhe informou que Delfim Neto, ainda Secretário da Fazenda em São Paulo, teria um papel de grande importância no Governo Federal. E, de fato, Delfim Neto foi Ministro da Economia mais de uma vez na década de 70, e dirigiu, direta ou indiretamente, os rumos da economia brasileira:

Marcos Viana marcou um jantar. Quando eu cheguei lá, a primeira pergunta que [Delfim Neto] me fez foi sobre o Amoroso Costa. Disse: ‘Foi você que escreveu aquele livro?’ Foi, eu e Antônio Paim. E Delfim fez uma enxurrada de elogios ao Amoroso Costa.

Segundo Gerhardt, a conversa se desenrolou em torno de Amoroso Costa e a Matemática, e pouco falaram dos assuntos que deveriam discutir originalmente. No entanto, como diz Gerhardt, essa primeira conversa gerou uma enorme empatia entre eles, e isto acabou indiretamente beneficiando a própria gestão do ES. E, por fim, salientou enfaticamente o grande interesse em matemática que tinha o ex-ministro Delfim Neto. “Somos amigos até hoje”, completou.



Figura 3: Auguste Comte (1798-1857).

5 Amoroso Costa e o Positivismo

A conversa sobre Amoroso Costa inevitavelmente desemboca na influência positivista no Brasil. O Positivismo foi uma doutrina (talvez possamos assim denominá-la) elaborada pelo filósofo francês Auguste Comte (1798-1857, ver Figura 3), e que teve forte repercussão no Brasil, tanto no meio acadêmico, mas sobretudo no meio militar. Quando a República é implementada no Brasil, em 1889, o positivismo tinha quase o status de doutrina oficial. Isto está perenizado no dístico escrito na bandeira brasileira, “Ordem e Progresso”, que era um lema positivista elaborado por Comte. Na verdade, Comte estabeleceu o lema “Ordem, Progresso e Amor”. Os responsáveis pela jovem República Brasileira tiveram por bem só reter as duas primeiras palavras.

Amoroso Costa, como lembra nosso interlocutor, empreendeu uma árdua luta contra o positivismo, no que foi apoiado por outros professores da Escola de Engenharia, alguns dos quais morreram também no acidente aéreo de 1928. Mas, por que esta aversão ao Positivismo? Afinal, em princípio o Positivismo eleva ao grau máximo da evolução da sociedade a ciência e a técnica. E mesmo abolindo os preceitos religiosos (considerado o estágio primitivo da sociedade humana), neles se espelha para instituir o Catecismo Positivista.

A questão, diz Gerhardt, era o fato de que o Positivismo via as ciências, inclusive a Matemática, como já acabadas e negavam a possibilidade de evoluírem. Eles não acreditavam em cálculo diferencial, afirmando que apenas a aritmética checada nos livros de Euclides estaria correta. Por ter realizado, entre outros, trabalhos sobre cálculo diferencial e análise complexa, o matemá-

tico alemão Carl Friedrich Gauss era, como diz Gerhardt, “uma ofensa para os positivistas”. Os ramos da matemática que Gauss inventou seriam, portanto, irreais. Outro exemplo da atitude intelectual dos positivistas era, por exemplo, a negação da veracidade do que é observado em microscópios.

De fato, Auguste Comte dizia que jamais chegaríamos a conhecer a constituição química das estrelas. Ele disse explicitamente [5]:

Nós podemos conceber a possibilidade de determinar sua forma, sua distância, sua grandeza e seu movimento, ao passo que nós não poderemos jamais estudar sua composição química.

Cinquenta anos depois da sua morte, a espectroscopia permitiria identificar os elementos químicos presentes nas estrelas através da decomposição da luz que delas recebemos. Os positivistas viam a ciência como algo que já se esgotou e todo trabalho futuro era atribuído às suas aplicações, através da Técnica, último estágio da evolução humana. Amoroso Costa denunciaria esta tentativa de impor “limites artificiais à ciência” [1].

Retornando ao assunto Amoroso Costa e suas contribuições à matemática e à ciência como um todo, Gerhardt enfatiza a visão que tinha Amoroso Costa da ciência. Amoroso Costa via, corretamente, a ciência (no que incluía a Matemática) como algo em constante evolução. Daí seu interesse pelo que estava acontecendo na sua época (Teoria da Relatividade Geral, Mecânica Quântica, Geometrias não-euclidianas, etc). Seu interesse pelas Geometrias não arquimedianas é bastante expressivo nesta busca por novas estruturas matemáticas e físicas.

Um outro detalhe fortuito iria por Gerhardt a par desta polêmica envolvendo o positivismo. Quando foi estudar no Rio de Janeiro, foi morar na Rua Benjamin Constant. Ora, Benjamin Constant (1836-1891) foi um oficial do exército e pensador político, um dos expoentes do movimento republicano e um dos mais ardorosos adeptos do positivismo, que ajudou a disseminar no Brasil, inclusive junto aos militares. Não fora então coincidência que, a Rua Benjamin Constant, onde se localizava a pensão em que Gerhardt morava, era também onde se encontrava o Templo Positivista do Rio de Janeiro.

À nossa observação de que o templo ainda está lá, mas sempre fechado (pelo menos aparente-

mente), Gerhardt disse que na sua época, ao contrário, ele estava sempre aberto: “Eu morando ali do lado, entrei várias vezes no Templo Positivista”.

E ao manifestarmos nossa surpresa, ele acrescenta ainda que no templo positivista havia uma parte de uma grade de madeira, que supostamente seria onde Auguste Comte chorava frente ao túmulo de Clotilde de Vaux, por quem Comte alimentara uma paixão platônica.

Descrevendo o Templo, Gerhardt nota a presença de estátuas e imagens de diversos filósofos clássicos admirados pelo Positivismo, como Aristóteles e Platão, que, segundo Gerhardt, eram louvados “como se fossem santos”. Além disso, citou o fato de que as obras de Auguste Comte, presentes no templo, eram impressas em papel-bíblia.

No entanto, Gerhardt dá indicações que a luta de Amoroso Costa contra o Positivismo foi coroado de sucesso, ao menos no meio acadêmico: “não se falava em Positivismo. Eu nunca ouvi falar de Positivismo dentro da Escola de Engenharia”.

Obviamente observamos que isso foi seguramente benéfico para abrir o meio acadêmico-científico brasileiro à ciência contemporânea, que está longe de ser um conjunto de conhecimentos concluído e sem possibilidade de evolução, como defendia Comte. Devemos muito a Amoroso Costa neste particular. Gerhardt complementa: “essa turma da Reação ao Positivismo foi a que recuperou o pensamento científico e matemático no Brasil”.

6 O baú, cinema e música

Terminamos a conversa especulando como localizar o baú com os papéis de Amoroso Costa, que eram tão zelosamente guardados pela viúva do Matemático e por sua nora. Talvez através de alguém do ramo da família de Alceu Amoroso Lima, de quem ela era irmã? Mostramos a Arthur Gerhardt o único exemplar que temos da tese de livre-docência de Amoroso Costa, versando sobre estrelas duplas, e que teve no seu júri, entre outros, Henrique Morize, diretor do Observatório Nacional no início do século XX. Morize foi um personagem importantíssima para a ciência bra-

sileira que, como já do, tornou possível a expedição a Sobral para as medidas durante o Eclipse de 1919, levando a Einstein a ser uma celebridade graças às previsões, então confirmadas, da teoria da relatividade geral sobre a deflexão da luz por corpos massivos. Aliás, Lélio Gama, co-autor da Introdução da Ref. [1], também participou desta expedição. Gerhardt nos faz prometer que lhe enviaremos uma cópia desta tese de Amoroso Costa.

Gerhardt é um cinéfilo e melômano voraz. Quando governador animou um cineclube com exibições de filmes clássicos, algo que marcou época. Ele aconselha ver o filme de Robert Bresson da década de 1950, *Um condenado à morte escapou* [6], e se interessa pelo lançamento recente de um *compact disc* (CD) contendo composições sinfônicas de Dom Pedro I [7].

Ele nos contou um episódio curioso relacionado à sua paixão pelo cinema. Em visita oficial a Roma, Itália, Gerhardt descobriu que um clássico do cinema, raramente exibido, iria ser apresentado em um cineclube. Seus anfitriões do governo italiano advertiram que o local da exibição era controlado por grupos com ligação com o sequestro e posterior morte do primeiro ministro italiano Aldo Moro, e o aconselharam a não ir. A advertência foi ignorada e ele foi, e sentou no chão (o cineclube estava lotado) junto a outros espectadores. Quando olhou para trás, viu que ele contava com a companhia de três seguranças. As autoridades italianas sabiam que ele iria ignorar a advertência.

Foi uma conversa de quase três horas que revelou o quanto surpreendente foram os pioneiros da ciência brasileira como Amoroso Costa. E também o quanto a incipiente atividade científica no Brasil sofreu com o seu desaparecimento precoce, assim como a necessidade de continuar revivendo seu legado. A primeira edição do livro de Amoroso Costa sobre relatividade geral é de 1922. A segunda, e última edição, data de 1995 e é uma raridade hoje, apesar de todas suas qualidades.

Agradecimentos

Agradecemos a Arthur Gerhardt Santos por nos receber para esta informal conversa sobre

Amoroso Costa. Agradecemos também a Cristina e Luciana Santos, suas filhas, por organizarem esta visita-entrevista. Agradecemos a Jaziel Goulart Coelho e José Domingos Fabris pela cuidadosa leitura do texto. Agradecemos ao CNPq e à FAPES pelo apoio financeiro.

Sobre os autores

Júlio C. Fabris (julio.fabris@cosmo-ufes.org) é professor do Departamento de Física da UFES. Luiz Filipe Guimarães (l.fi.guimaraes@gmail.com) é pesquisador no Departamento de Física da UFES.

Referências

- [1] M. A. Costa, *As ideias fundamentais da matemática e outros ensaios*, prefácio de A. G. Santos, L. Gama e A. Paim (Editora Convívio/Edusp, São Paulo, 1981).
- [2] M. A. Costa, *Introdução à Teoria da Relatividade* (Süsskind de Mendonça, Rio de Janeiro, 1922), reeditado por Livraria Científica Brasileira/Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.
- [3] J. Eisenstaedt e J. C. Fabris, *Amoroso Costa e o primeiro livro brasileiro sobre a Relatividade Geral*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**(2), 185 (2004).
- [4] A. Eddington, *Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory* (Cambridge University Press, Cambridge, 1920).
- [5] A. Comte, *Cours de Philosophie Positive* (Bachelier, Paris, 1835).
- [6] *Um Condenado à Morte Escapou*, Direção: Robert Bresson (França, 1956).
- [7] *Pedro I of Brazil: Te Deum / Credo*, Orquestra Filarmônica de Minas Gerais (Naxos, Alemanha, 2022), 1 CD.

Apêndice A: A teoria de Einstein

por Amoroso Costa.¹

Segundo anuncia um telegrama de Londres, os resultados obtidos pelas missões, que observaram o eclipse solar de 29 de maio último, estão de acordo com a teoria física de Einstein. Essa notícia destinada a um público muito restrito, merece contudo um ligeiro comentário, pondo de lado os detalhes técnicos; com efeito uma circunstância particular a torna interessante para qualquer pessoa culta; os astrônomos ingleses constataram um fenômeno previsto pelos cálculos do sábio professor suíço.²

A teoria de Einstein, que generaliza os trabalhos de Lorenz sobre o princípio da relatividade, é uma vasta síntese abrangendo não só os fenômenos mecânicos, óticos, elétricos e magnéticos, mas a própria gravitação. Em uma primeira aproximação, ela conduz à dinâmica clássica, suficiente no caso das pequenas velocidades; e em segunda aproximação, permite dar conta de fatos que não se ajustam aos quadros antigos, como o movimento do periélio de Mercúrio, não explicado pela mecânica celeste newtoniana.

Uma consequência fundamental do sistema é que a propagação da luz em um campo de gravitação não é retilínea nem tem velocidade uniforme. Assim, o raio luminoso, que nos envia uma estrela, sofre um desvio apreciável, se bem que muito pequeno, na vizinhança de um astro de forte massa, como o sol. Tudo se passa como se o raio luminoso fosse um fio pesado, que a atração solar deformasse; o observador terrestre deve então ver a estrela aparentemente deslocada, na

¹[N.T.]: Transcrito de *O Jornal*, ano I, nº 149, Rio de Janeiro, 12 de novembro de 1919. Atualizou-se a ortografia do texto.

²[N.T.]: Na verdade, Albert Einstein nasceu em Ulm, na Alemanha, e não na Suíça.

direção do centro do sol, da posição que ocupa quando este se acha em outra região do céu.

O efeito só é sensível quando o Sol está muito perto do raio considerado; comprehende-se, pois que apenas possa ser observado por ocasião de um eclipse total, quando a Lua oculta o disco solar. Ora, o eclipse de 29 de maio apresentou uma oportunidade excepcional; o Sol achava-se então no grupo das Híades, muito rico em estrelas brilhantes, e foi possível obter fotografias em que figuram as imagens de mais de dez estrelas vizinhas. Comparando essas fotografias com outras tiradas um mês depois, quando o Sol já se afastara muito daquele grupo, medidas de grande precisão permitiram finalmente decidir da existência do efeito enunciado por Einstein. Tal o programa realizado, com o mais esplêndido sucesso, pelas missões do Observatório de Greenwich, que a Royal Society enviou ao Ceará e à Ilha do Príncipe.

O resultado obtido tem sobretudo uma importância indireta, pois equivale a uma justificativa experimental das hipóteses admitidas. Esse fato poderá até certo ponto compensar a estranheza que causam alguns princípios da nova teoria, em que as noções de censo comum sobre o espaço e o tempo sofreram modificações profundas. Como quer que seja, ela já conseguiu não só submeter ao cálculo fenômenos que lhe eram até então vedados, mas ainda descobrir outros nunca dantes observados, e isso lhe confere o máximo valor a que pode pretender uma teoria física dedutiva.

Sejamos justos, entretanto; a mecânica newtoniana continuará a existir, porque é muito mais simples e desempenha perfeitamente o papel que lhe cabe em um domínio limitado. A ideia nova fixou, talvez definitivamente, as fronteiras desse domínio; é a primeira grande notícia de ciência pura que nos manda, depois da guerra, a Europa sempre fecunda.

Acompanhando e registrando a região ativa de manchas solares AR 3363 por 14 dias consecutivos

Vinícius Alessandro Silva Queiroz¹ e Ricardo José Vaz Tolentino²

¹Universidade Federal de Ouro Preto

²Observatório Lunar Vaz Tolentino

Resumo

O foco central deste artigo é detalhar, por meio de observações, o desenvolvimento da mancha solar denominada AR 3363 ao longo de 14 dias. Manchas solares emergem na fotosfera, uma região que representa a fronteira entre o interior do Sol e sua atmosfera. Ao utilizar telescópios equipados com filtros H-Alpha para a observação solar, conseguimos capturar imagens de AR3363, desde o instante em que emerge no lado leste do Sol até o momento em que desaparece no lado oeste. Isso nos possibilitou capturar fotografias, documentando toda a transição dessa região ativa na superfície solar. Além disso, o artigo explora as diferentes camadas do Sol.

Abstract

The main focus of this article is to detail, through observations, the development of the sunspot named AR 3363 over 14 days. Sunspots emerge in the photosphere, a region that represents the boundary between the interior of the Sun and its atmosphere. By using telescopes equipped with H-Alpha filters for solar observation, we were able to capture images of AR 3363 from the moment it emerged on the west side of the Sun until it disappeared on the east side. This enabled us to capture photographs, documenting the entire transition of this active region on the solar surface. Additionally, the article explores the different layers of the Sun.

Palavras-chave: astronomia, sol, manchas solares

Keywords: astronomy, sun, sunspot

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43558](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43558)

1 Introdução

O Sol, com sua natureza dinâmica, tem instigado a curiosidade de cientistas e astrônomos por séculos. Entre os inúmeros fenômenos que ocorrem em sua superfície incandescente de gás ionizado, as manchas solares surgem como características intrigantes e distintivas, demarcando áreas específicas de temperatura reduzida e atividade magnética intensa. Em tais regiões, a intensidade do campo magnético geralmente varia entre 1000 G a 3000 G [1], ao passo que o campo magnético terrestre, em sua superfície, é de aproximadamente 0,5 G.

O intenso campo magnético presente nas manchas solares atua como uma espécie de válvula e dissipador térmico, interrompendo o fluxo de calor e energia proveniente do interior solar [2]. Isso resulta em manchas solares que são mais frias e mais escuras em comparação com suas áreas cir-

cundantes. A intensidade do magnetismo exerce uma pressão que naturalmente busca afastar os campos magnéticos [2]. Contudo, foi descoberto que o material em movimento exerce uma pressão contra os campos magnéticos das manchas solares, mantendo-as firmemente em sua posição [2].

O Sol passa por mudanças significativas em seus campos magnéticos polares próximo ao pico da atividade de manchas solares. Durante o período de máximo solar, os campos polares experimentam uma reversão de polaridade, mantendo predominantemente características unipolares ao longo da maior parte do ciclo solar [3]. De maneira geral, a reversão de polaridade no campo polar ocorre de forma não simultânea entre os hemisférios Norte e Sul. Essa assincronia no processo de reversão reflete a assimetria inerente da atividade solar entre os hemisférios, especialmente nos campos magnéticos de alta latitude.

Devido à constante variação do campo magnético do Sol, as manchas solares são temporárias, com períodos de vida que abrangem desde algumas horas até meses. Além disso, o número total de manchas solares varia periodicamente, oscilando entre um máximo, um mínimo e retornando a um máximo, em um ciclo de aproximadamente 11 anos [4]. Em alguns períodos de atividade solar mínima, não há a presença de nenhuma mancha solar, ao passo que durante o pico de atividade solar não é incomum observar várias manchas solares [1].

Essas manchas escuras, observadas pela primeira vez de maneira sistemática por Galileu no início do século XVII [5], continuam sendo um ponto focal da pesquisa solar, para entendermos melhor os mecanismos internos do Sol.

2 Sobre o Sol

O Sol é uma estrela anã amarela com cerca de 4,6 bilhões de anos [6], e ocupa a posição central em nosso Sistema Solar como o corpo celeste mais massivo. Enquanto todos os planetas e satélites combinados contribuem com apenas 0.2% da massa total do Sistema Solar, a esmagadora maioria, ou seja, 99.8% da massa, é atribuída exclusivamente ao Sol. Essa predominância massiva resulta em uma intensa atração gravitacional exercida pelo Sol, sendo responsável por induzir o movimento orbital de planetas, satélites e outros objetos que compõem o Sistema Solar ao seu redor. [5].

A distância média da Terra ao Sol é de $1,496 \times 10^8$ km. Com 6.957×10^5 km [7] de raio, o Sol é cerca de 109 vezes maior que a Terra. A temperatura solar exibe uma ampla variação, oscilando de 5.500 °C na superfície a incríveis 15 milhões de °C em seu núcleo [5]. Além disso, o Sol completa uma órbita ao redor do centro da Via Láctea em um período de 250 milhões de anos.

O Sol não possui corpo sólido, por isso não tem um limite externo definido. O Sol é uma esfera brilhante e giratória composta por gases muito quentes (plasma ou gás ionizado), principalmente o hidrogênio (91.2%) e o hélio (8.7%) [5].

2.1 As camadas do Sol

O Sol possui uma complexa estrutura interna definida em 6 camadas, que podemos dividir em dois grupos: *i)* Camadas internas: núcleo ou interior solar, zona radioativa e zona convectiva; *ii)* Camadas externas: fotosfera, cromosfera, corona (ou coroa) que é a camada mais externa [2].

2.2 O núcleo

A abundante fonte de energia solar, manifestada em luz e calor, provém do núcleo solar. Este núcleo, composto por plasma a uma temperatura extraordinariamente elevada, estimada em cerca de 15 milhões de graus Celsius [5], resulta da fusão dos núcleos dos átomos de hidrogênio, originando hélio [8]. Este processo desencadeia reações nucleares térmicas contínuas, liberando consideráveis quantidades de energia. Essa energia é então transmitida para as camadas externas do Sol por meio de radiação e convecção, movendo-se de forma contínua.

2.3 A zona radiativa

Nessa região, a transferência de energia para o exterior ocorre através da radiação, ou seja, a energia é absorvida, dispersada e reemitida nessa camada específica do interior solar. Isso ocorre devido à densidade elevada no local, fazendo com que as partículas colidam entre si. Essa condição resulta em uma menor efetividade na transferência de energia se comparada à zona convectiva [9].

2.4 A zona convectiva

Na base da zona convectiva a temperatura é de aproximadamente 2×10^6 Kelvin [10]. A eficiência da radiação diminui à medida que nos afastamos para o exterior, devido ao aumento na opacidade do plasma. Grande parte do transporte de energia ocorre por convecção térmica nessa região. O interior radiativo e a zona convectiva são divididos por uma camada fina ($\approx 0,05 R_\odot$), onde a estratificação passa rapidamente de estabilidade convectiva para instabilidade marginal [10]. Essa área, conhecida como tâcocline, também mostra uma transição nítida entre a rotação de corpo sólido do interior radiativo e a rotação diferencial da zona de convecção externa.

A rotação diferencial do Sol e sua habilidade em gerar campos magnéticos em larga escala por meio de uma ação dinâmica cíclica parecem estar intrinsecamente conectadas. Acredita-se que o comportamento do dínamo global seja responsável pelo surgimento de extensas regiões ativas e manchas solares [11].

2.5 A fotosfera

Refere-se à camada visível do Sol, conhecida como fotosfera. Com uma espessura estreita de aproximadamente 500 km, equivalente a cerca de meio milésimo do raio solar, a fotosfera desempenha um papel crucial na emissão da maior parte da luz visível [12]. Existem três razões principais para isso. Primeiramente, tanto a cromosfera quanto a coroa, que estão situadas acima, são praticamente transparentes à luz visível. Por conseguinte, o gás nesta camada não é completamente transparente; sua opacidade impede a visualização do interior solar. Por fim, a extensão e a temperatura significativas da fotosfera a transformam em uma potente fonte térmica de radiação [12].

No contexto específico da radiação solar, a Curva de Planck revela distintos padrões que ressaltam a intensidade relativa da radiação em diferentes regiões do espectro eletromagnético. Notavelmente, ao analisarmos a Curva de Planck para o Sol, observamos uma emissão radiante concentrada na faixa do espectro visível, com um pico proeminente em torno de $\lambda = 500\text{nm}$ [13]. A Figura 1 apresenta a Curva de Planck para o Sol, evidenciando a predominância da radiação na região visível do espectro eletromagnético.

Para além dos característicos padrões granulares, nesta camada, tornam-se visíveis manchas escuras que emergem e, de forma praticamente completa, desvanecem regularmente em ciclos com uma média de aproximadamente 11 anos [4].

A fotosfera também é a fonte das explosões solares que se estendem por centenas de milhares de quilômetros acima da superfície do sol, explosões solares produzem rajadas de raios-X, radiação ultravioleta, radiação eletromagnética e ondas de rádio [14]. A Figura 2 representa a captura da fotosfera solar.

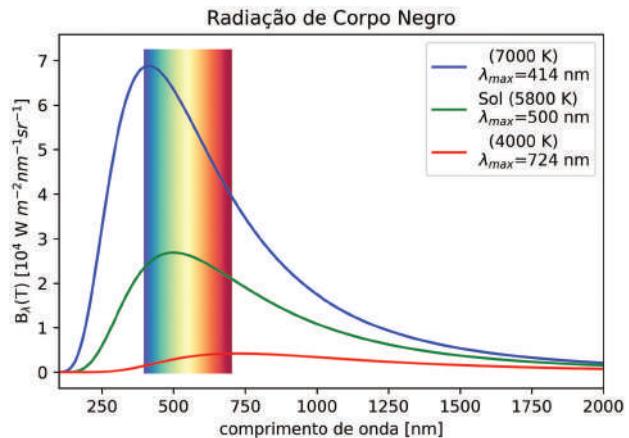


Figura 1: A análise da Curva de Planck, adaptada para o Sol, revela que o pico de sua emissão de radiação ocorre na região do espectro visível [13].

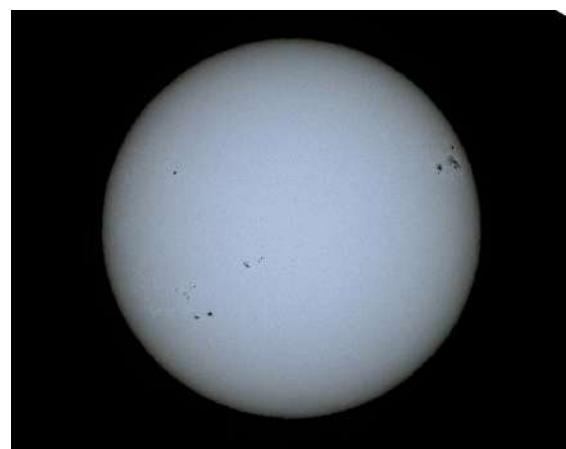


Figura 2: Fotosfera Sol em 03 de julho de 2023, 09:12:52 (12:12:52 UT), apresentando algumas regiões ativas de manchas solares.

2.6 A cromosfera

A Cromosfera – Figura 3 – é uma região de transição entre a Fotosfera e a Coroa ou Corona solar. É considerada a atmosfera inferior do Sol. Essa camada é chamada de Cromosfera porque o alto teor de hidrogênio superaquecido emite um brilho avermelhado quando vista através de um telescópio solar dedicado equipado com filtro H-Alpha [5].

A cromosfera é uma zona rasa, com cerca de 2.000 km de espessura, que brilha em vermelho à medida que é aquecida pela energia da fotosfera. As temperaturas na cromosfera variam de cerca de 4.300 K na base a mais de 40000K a 2500 km de altura [5].



Figura 3: Cromosfera solar registrada em 03 de julho de 2023, 08:52:22 (11:52:22 UT). Observe a presença de alguns filamentos e proeminências.

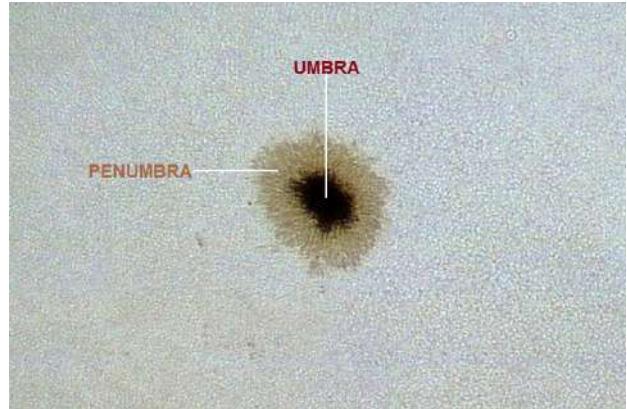


Figura 4: A região ativa AR 2546, registrada na Fotosfera solar em 18 de maio de 2016, 10:18:14 (13:18:14 UT).

2.7 A corona

Corona ou Coroa é a atmosfera externa do Sol e não tem limite superior observável. Ela é a fonte do vento solar (fluxo de partículas carregadas e energizadas, que viajam com velocidade muito alta) que se estende por milhões de quilômetros pelo espaço, além das órbitas da Terra e dos demais planetas. Os ventos solares atingem temperatura de 1 milhão de graus Celsius, com velocidade média de 600 km/s [2].

Como o vento solar é também considerado uma extensão da atmosfera do Sol, a Terra tem o trajeto de sua órbita dentro da atmosfera do Sol. A Corona pode ser observada como uma auréola branca brilhante durante um Eclipse Solar total [2].

2.8 As manchas solares

As Manchas solares são fenômenos temporários causados em regiões da Fotosfera por campos magnéticos irregulares e desordenados, originários da zona convectiva do Sol [15]. As perturbações dos campos magnéticos causam a diminuição da pressão das massas gasosas e consequente redução da temperatura dos locais afetados (em relação às regiões vizinhas mais quentes), tornando tais locais menos brilhantes ou escuros.

As Manchas solares podem durar dias, semanas ou meses na fotosfera do Sol. Elas podem se expandir ou contrair (e até desaparecer) à medida que se movimentam ao redor da superfície da esfera solar.

A estrutura visual de uma mancha solar é com-

posta por sua região central mais escura, conhecida como umbra, que é circundada pela região menos escura, conhecida como penumbra [1]. Na Figura 4. A área de abrangência de uma mancha solar pode superar várias vezes o tamanho da superfície do planeta Terra.

A área de uma mancha solar é calculada tendo como base o hemisfério visível do Sol, ou seja, a metade de sua superfície total, sua unidade é MH (“Milionésimos do Hemisfério” visível) [16]. O valor de 1 MH corresponde a aproximadamente 3,04 milhões de Km².

Toda a superfície do planeta Terra (510.072.000 km²) tem aproximadamente 169 milionésimos do disco solar visível (ou 169 MH). Como exemplo, uma mancha solar com cerca de 500 MH de área, poderia conter aproximadamente 3 Terras.

2.9 O ciclo solar 25

O ciclo solar tem início com um campo poloidal, definido pelo campo magnético contido nas regiões polares do Sol. Com a rotação diferencial, esse campo poloidal se transforma em uma configuração toroidal, resultando no surgimento de regiões ativas na fotosfera. À medida que o ciclo solar progride, a convecção turbulenta e o fluxo meridional dispersam o campo magnético das regiões ativas. Esses mecanismos de transporte levam ao acúmulo de fluxo magnético de polaridade posterior das regiões ativas em declínio nas latitudes solares mais altas, eventualmente revertendo a polaridade dos campos magnéticos polares e iniciando o próximo ciclo solar [17].

A frequência, quantidade e tamanho das man-

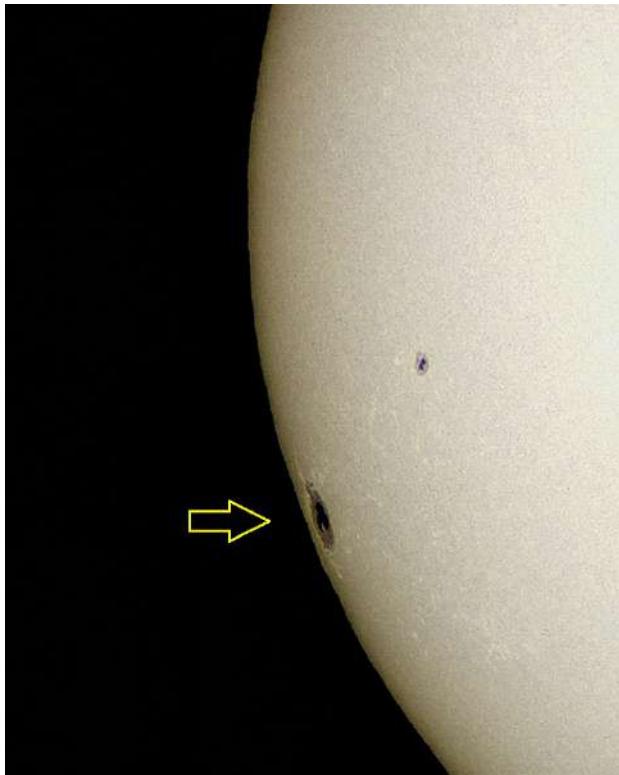


Figura 5: O surgimento da região ativa AR 3363, em 06 de julho de 2023, 10:39:32 (13:39:32 UT), no limbo sudeste (Lat: S 21° e Lon: E 75°).

chas solares refletem a intensidade e potencialidade das regiões ativas ao longo do período cíclico solar, definido num espaço temporal de 11 anos [18].

Desde 1755 os cientistas acompanham e registram os ciclos solares. O Sol encontra-se hoje em seu ciclo 25 e caminha de forma branda e lenta, em relação ao crescimento da frequência e quantidade de manchas [19].

O ciclo solar 25 iniciou seu percurso em dezembro de 2019, irá até 2030 e atingirá seu pico em 2025, quando ocorrerão tempestades solares e consequentes formações de auroras, embora espere-se que seja um ciclo brando [15].

2.10 A rotação do Sol

Nas coordenadas heliográficas, o lado esquerdo do disco solar é definido como leste e o lado direito é definido como oeste. Assim, as manchas solares se movem pelo hemisfério visível do Sol de leste para oeste [20]. Porém, diferentes regiões do Sol, giram em taxas diferentes [20].

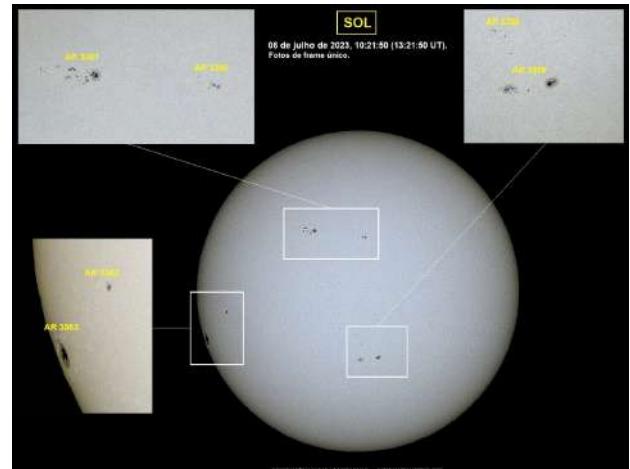


Figura 6: Imagens da fotosfera do Sol em 06 de julho de 2023, mostrando as demais regiões ativas de manchas solares presentes na data, além de AR 3363, porém todas menores. Disco solar em 10:21:50 (13:21:50 UT).

3 Acompanhando e registrando a Região Ativa de Manchas Solares AR 3363 por 14 dias consecutivos

De 6 a 19 de julho de 2023, aproveitando 14 dias seguidos sem muitas nuvens, registramos o aparecimento, deslocamentos, alterações e desaparecimento da proeminente região ativa de manchas solares AR 3363, através do hemisfério visível do Sol.

Foi uma experiência muito gratificante acompanhar o Sol e as evoluções de suas belas formações efêmeras embarcadas, tanto na faixa do espectro da radiação solar no comprimento de onda da luz visível (otosfera, 400 a 700 nm), utilizando refratores APO com filtro Baader, quanto no comprimento de onda H-Alpha vermelho (chromosfera, 656 nm), com o telescópio solar dedicado Lunt LS50THa. A unidade de medida “nm” significa nanômetro e corresponde a 1 bilionésimo de 1 metro ou 10^{-9} metro ou 0,000.000.001 metro.

3.1 Primeiro dia: 6 de julho de 2023

Nesse dia, a Terra atingiu o “afélio”, ou seja, o ponto da órbita de nosso planeta mais distante do Sol.

Em 6 de julho de 2023 a região ativa AR 3363 fez sua primeira aparição – como mostra a Figura 5 – no limbo solar do quadrante sudeste. Nos momentos das capturas das imagens, AR 3363 encontrava-se posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 21° e Lon: E 75°. Nessa oportunidade

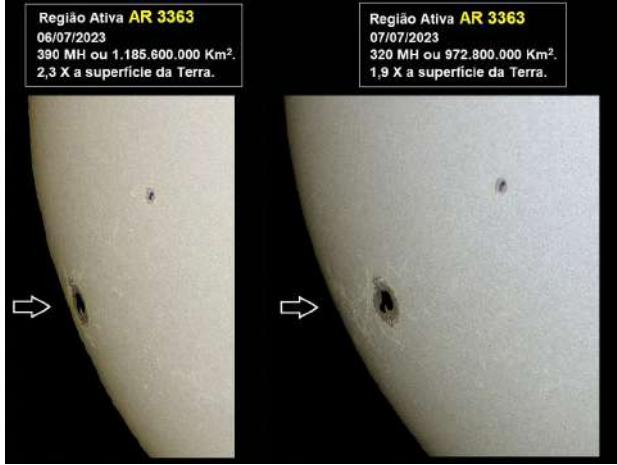


Figura 7: AR 3363 em 06 e 07 de julho de 2023. Note o deslocamento de AR 3363, que se afastou do limbo solar sudeste. Esquerda em 06/07/2023, 10:39:32 (13:39:32 UT). Direita em 07/07/2023, 09:42:04 (12:42:04 UT).

dade, AR 3363 era formada por apenas 1 mancha solar, com classificação magnética α (alfa ou unipolar) – Figura 6. Seu tamanho apresentava 390 MH (390 Milionésimos do Hemisfério visível do Sol), ou seja, ocupava uma área da fotosfera de aproximadamente 1.185.600.000 km². Tal valor representaria cerca de 2,3 vezes a superfície total do planeta Terra.

3.2 Segundo dia: 7 de julho de 2023

Em 7 de julho de 2023, a região ativa AR 3363 já havia se deslocado do limbo sudeste lunar – como pode ser observado na Figura 7 – e continuava no paralelo S 21° em direção a Oeste. Nessa oportunidade, AR 3363 diminuiu um pouco sua área de abrangência, de 390 MH (no dia anterior) para 320 MH, ou seja, 972.800.000 km². Tal valor representa aproximadamente 1,9 vezes a superfície total do planeta Terra. AR 3363 continuava a conter apenas 1 mancha solar embarcada, com a mesma classificação magnética α (alfa ou unipolar).

As classificações magnéticas α , β , γ e δ descrevem a complexidade dos campos magnéticos presentes no Sol. As regiões α são caracterizadas por intensos e predominantes campos magnéticos, como nas regiões ativas, que incluem manchas solares. As áreas β , embora não tão fortes quanto as α , ainda exercem influência significativa sobre o ambiente magnético solar.

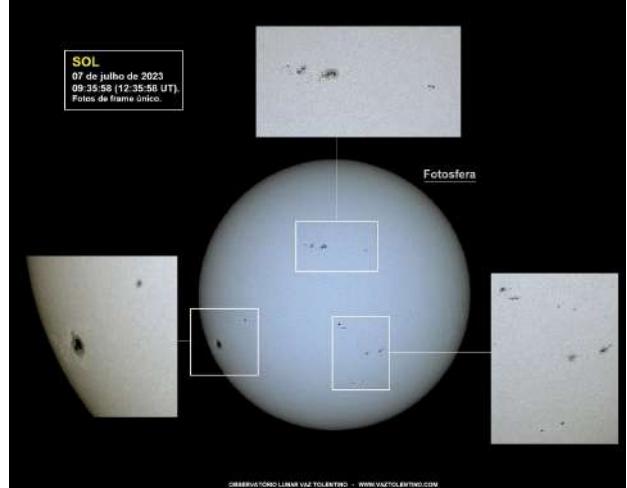


Figura 8: Mosaico da Fotosfera solar em 07 de julho de 2023, apresentando todas as regiões ativas presentes no momento da captura da imagem (disco solar em 09:35:58 ou 12:35:58 UT).



Figura 9: Cromosfera solar e a região ativa AR 3363 em 07/07/2023, 09:59:30 (12:59:30 UT).

Por outro lado, as regiões γ podem representar áreas de menor atividade magnética ou em transição. Já as áreas δ , associadas a complexas interações magnéticas, podem ser locais de intensa atividade e instabilidade, como zonas de inversão magnética ou onde ocorrem erupções solares [21].

A Figura 8 representa todas as regiões ativas presentes no dia referido.

No momento dos registros das imagens, a localização de AR 3363 estava nas coordenadas heliográficas Lat: S 21° e Lon: E 64° – Figura 9.

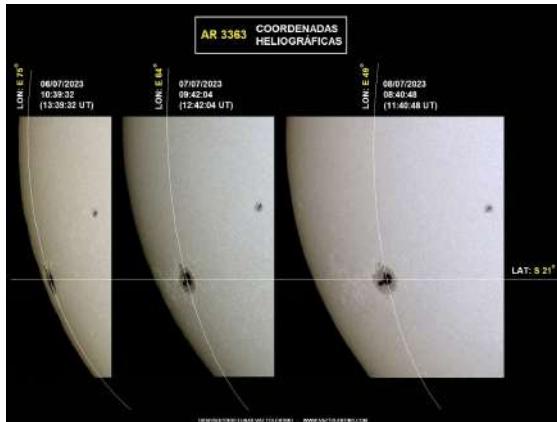


Figura 10: Três dias seguidos, apresentando AR 3363 evoluindo para oeste através dos meridianos e mantendo-se firme no paralelo Latitude S 21º. A data e horário específicos de cada imagem, estão por sobre cada foto.

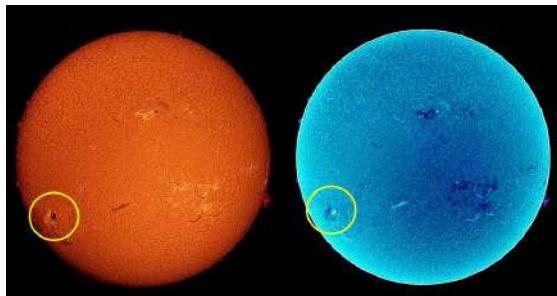


Figura 11: Cromosfera em dois tempos, na manhã de 08 de julho de 2023. No detalhe, a região ativa AR 3363.

3.3 Terceiro dia: 8 de julho de 2023

Em 8 de julho de 2023, a região ativa de manchas solares AR 3363 continuava seguindo firme para o oeste, através do paralelo S 21º. A novidade foi ter alterado sua configuração, de 1 para 2 manchas embarcadas, como pode ser visto nas Figuras 10 e 11.

Seu tamanho manteve-se em 320 MH (cerca de 1,9 vezes o tamanho do planeta Terra), e a classificação magnética continuava α (alfa ou unipolar). No momento dos registros das imagens, AR 3363 estava localizada nas coordenadas heliográficas Lat: S 21º e Lon: E 49º – Figura 12.

3.4 Quarto dia: 9 de julho de 2023

Em 9 de julho de 2023, a região ativa AR 3363 se manteve, evoluindo em sua travessia do hemisfério solar visível em direção ao oeste, através do paralelo S 21º. No momento das capturas das imagens – Figuras 13 e 14, sua



Figura 12: Fotosfera em 08 de julho de 2023 e a região ativa AR 3363. Data e horários na parte superior das fotos.



Figura 13: A destacada AR 3363 em 09/07/2023, 10:50:16 (13:50:16 UT).



Figura 14: A Cromosfera do Sol (lado direito, em 09/07/2023, 09:53:32 ou 12:53:32 UT) e a região ativa AR 3363 (nos detalhes, mesma data).

configuração mantinha as 2 manchas solares embarcadas, além do tamanho de 320 MH ou 972.800.000 km² (1,9 vezes a superfície total da Terra), mas sua classificação magnética passou a ser β (beta ou bipolar). A Figura 15 representa a progressão de AR 3363 durante 4 dias.

As imagens foram registradas quando AR 3363 estava posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 21º e Lon: E 34º.



Figura 15: AR 3363 em 4 dias consecutivos (06, 07, 08 e 09 de julho de 2023), caminhando para Oeste, através do paralelo latitude S 21º. Datas e horários na parte superior das fotos.

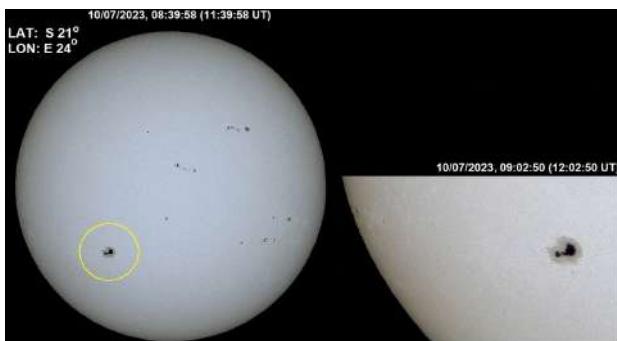


Figura 16: Fotosfera em 10/07/2023. Datas e horários nas fotos.



Figura 17: A Cromosfera em 10/07/2023 e a região ativa AR 3363.

3.5 Quinto dia: 10 de julho de 2023

Na manhã de 10 de julho de 2023, AR 3363 voltou a ter sua classificação magnética como α (alfa ou unipolar). Sua área de abrangência foi mantida em 320 MH (1,9 vezes a Terra), e continuaram as 2 manchas solares embarcadas – veja a Figura 16. AR 3363 continuou seguindo através da latitude S 21º pelo quinto dia consecutivo. Imagens registradas com AR 3363 nas coordenadas heliográficas Lat: S 21º e Lon: E 24º. A Figura 17 representa a cromosfera solar no dia em questão.



Figura 18: A região ativa de manchas solares AR 3363 em 11 de julho de 2023, 10:56:02 (13:56:02 UT).

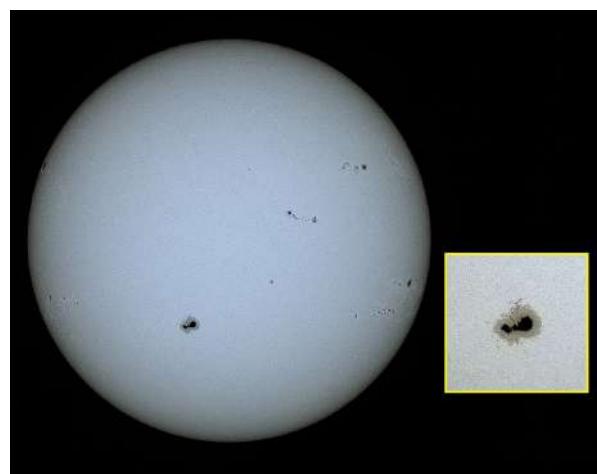


Figura 19: Cromosfera solar, com o hemisfério visível e a região ativa AR 3363 em (disco solar) 11 de julho de 2023, 10:24:18 (13:24:18 UT).

3.6 Sexto dia: 11 de julho de 2023

Na manhã do dia 11 de julho de 2023, a região ativa AR 3363 apresentava um notável aumento em sua extensão – como pode ser observado na Figura 18, pois sua área de abrangência evoluiu significativamente, passando de 320 MH no dia anterior para 720 MH, totalizando 2.188.800.000 km².

O tamanho de 720 MH corresponderia a aproximadamente 4,3 vezes a superfície total do planeta Terra. A Figura 19 representa a cromosfera solar no dia 11 de julho.

A quantidade de manchas solares embarcadas na região ativa AR 3363 também deu um grande salto, de 2 no dia anterior, para 15 manchas.

No momento do registro de AR 3363, sua classificação magnética estava novamente definida

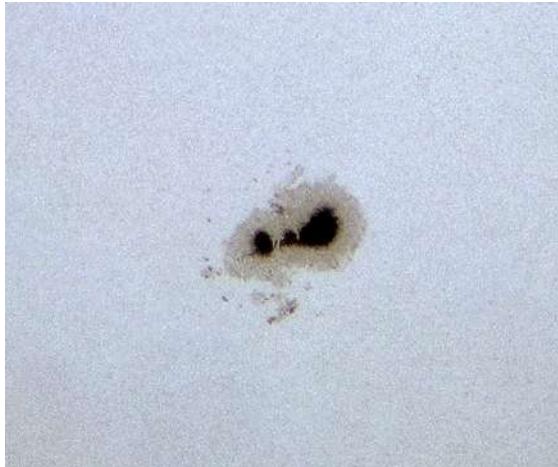


Figura 20: A região ativa de manchas solares AR 3363, registrada em 12 de julho de 2023, 09:36:30 (12:36:30 UT).

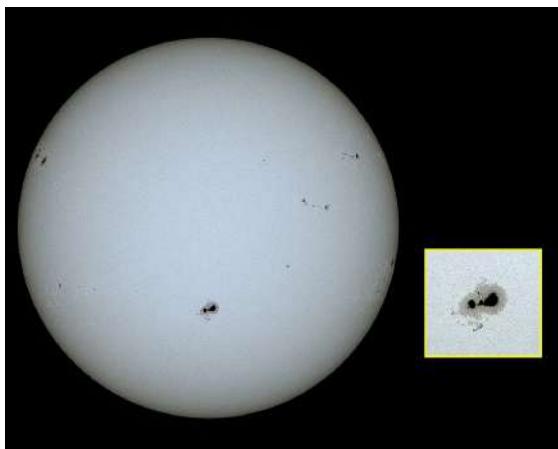


Figura 21: Hemisfério solar visível e AR 3363 em 12 de julho de 2023, 08:57:38 (11:57:38 UT).

como β (beta ou bipolar), e estava posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 21° e Lon: E 12° .

3.7 Sétimo dia: 12 e julho de 2023

Na manhã ensolarada de 12 de julho de 2023, o Sol nos trouxe a região ativa de manchas solares AR 3363 um pouco maior que no dia anterior, apresentando tamanho de 780 MH ou $2.371.200.000 \text{ km}^2$ – Figura 20. Comparado com a superfície total de nosso planeta, essa área de abrangência corresponderia a 4.6 Terras.

No momento do registro da imagem de AR 3363, a região apresentava classificação magnética definida como β (beta ou bipolar) e estava posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 21° e Lon: W 00° (atingiu o meridiano principal,

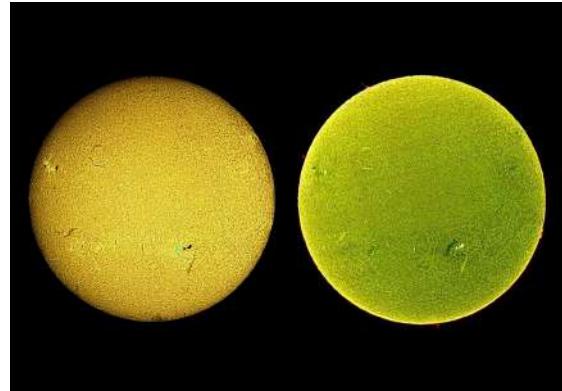


Figura 22: Cromosfera solar em duas versões na manhã de 13 de julho de 2023. Esquerda – 11:51:48 (14:51:48 UT). Direita – 11:57:38 (14:57:38 UT).

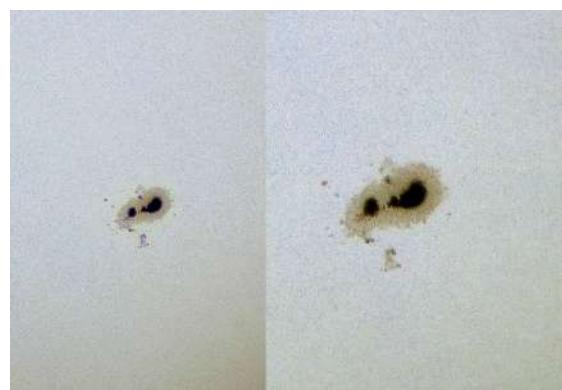


Figura 23: A região ativa de manchas solares AR 3363 na manhã de 13 de julho de 2023 em dois momentos. Esquerda (11:19:58 ou 14:19:58 UT) e direita (11:41:14 ou 14:41:14 UT).

e estava posicionada um pouco abaixo do centro do disco solar) – observe a Figura 21.

Também, sua configuração em relação ao número de manchas solares embarcadas pulou de 15 (no dia anterior) para 21 manchas.

3.8 Oitavo dia: 13 de julho de 2023

No momento dos registros das imagens do Sol, na manhã de 13 de julho de 2023, a região ativa de manchas solares AR 3363 (Figura 22) tinha aumentado sua quantidade de manchas embarcadas para 30, quando também apresentava tamanho um pouco maior que no dia anterior, passando de 780 MH para 800 MH ou $2.432.000.000$ milhões de km^2 – Figura 23. Tal área de abrangência corresponderia a aproximadamente 4,7 superfícies totais do planeta Terra.

Em 13 de julho de 2023, a região ativa AR 3363



Figura 24: Fotosfera na manhã de 13 de julho de 2023, com o disco solar registrado às 11:06:06 (14:06:06 UT).

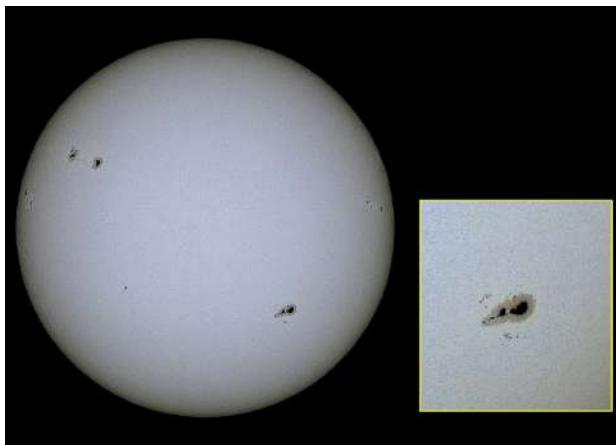


Figura 25: Fotosfera solar (hemisfério solar visível) em 14 de julho de 2023, 13:08:56 (16:08:56 UT). No destaque, a proeminente AR 3363.

passou a apresentar uma configuração magnética mais complexa, conhecida como $\beta-\delta$ (beta-delta), caracterizada como um grupo de manchas solares de classificação magnética bipolar geral ou beta, mas que contém uma (ou mais) mancha do tipo delta, com umbra de polaridade oposta em uma única penumbra.

No momento das capturas das imagens, AR 3363 estava posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 21° e Lon: W 13° – como podemos ver na Figura 24.

3.9 Nono dia: 14 de julho de 2023

A região ativa de manchas solares AR 3363 foi registrada no início da tarde de 14 de julho de 2023, quando estava posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 21° e Lon: W 29° – veja a Figura 25.

No momento dos registros das imagens, a configuração magnética de AR 3363 continuava como no dia anterior ($\beta-\delta$), assim como também man-



Figura 26: A região ativa de manchas solares AR 3363 em 14 de julho de 2023, 12:51:20 (15:51:20 UT).



Figura 27: Cromosfera em dois tempos, início da tarde de 14 de julho de 2023. Esquerda, 13:20:34 (16:20:34 UT). Direita, 13:19:20 (16:19:34 UT).

teve seu tamanho em 800 MH ou 2.432.000.000 milhões de km² – Figura 26. Porém, o número de manchas solares embarcadas diminuiu de 30 para 20 unidades. A Figura 27 representa a cromosfera em dois tempos.

3.10 Décimo dia: 15 de julho de 2023.

Na manhã de 15 de julho de 2023, a região ativa de manchas solares AR 3363 estava posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 22° e Lon: W 41° – Figura 28. Através de seu deslocamento ao longo do hemisfério solar visível, pela primeira vez em 10 dias, AR 3363 desceu para a Latitude 22° Sul. Desde o seu surgimento no limbo su-

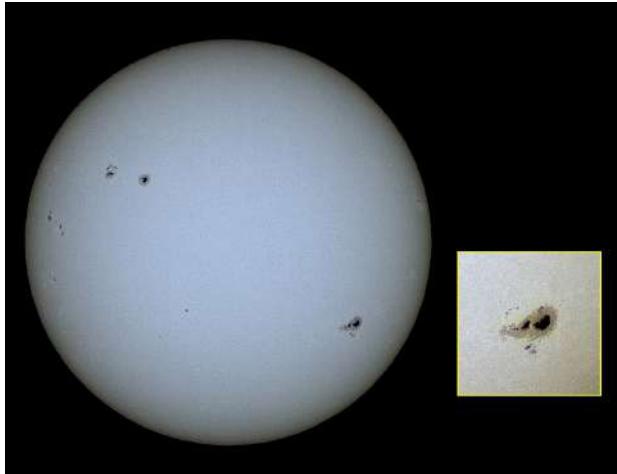


Figura 28: Fotosfera solar (disco solar) em 15 de julho de 2023, 11:55:56 (14:55:56 UT) e a região ativa de manchas solares AR 3363.



Figura 29: AR 3363 em 15 de julho de 2023, 12:04:38 (15:04:38 UT).

deste solar, em 06 de julho de 2023 – Figura 5, ela manteve-se sempre evoluindo através do paralelo 21º Sul em direção ao limbo Oeste.

Nessa oportunidade, AR 3363 reduziu seu número de manchas para 11 e também diminuiu um pouco sua área de abrangência de 800 MH, no dia anterior, para 720 MH ou 2.188.800.000 km² – Figura 29, o que corresponde a cerca de 4,3 Terras.

A configuração magnética de AR 3363 em 15 de julho de 2023 tornou-se mais complexa, caracterizando-se como $\beta-\gamma-\delta$ (beta - gamma - delta), ou grupo bipolar de manchas solares complexo o suficiente ($\beta-\gamma$ ou beta - gamma) para que nenhuma linha possa ser traçada entre manchas de polaridades opostas, mas contém uma (ou mais) mancha solar do tipo delta (δ), ou mancha com umbra de polaridade oposta em uma única penumbra.

3.11 Décimo primeiro dia: 16 de julho de 2023

Na manhã de 16 de julho de 2023, apesar do céu nublado e atmosfera turbulenta, conseguimos



Figura 30: AR 3363 em 16 de julho de 2023, 10:10:58 (13:10:58 UT).



Figura 31: O disco solar e a região ativa AR 3363 em 16/07/2023.

registrar rapidamente a região ativa de manchas solares AR 3363 – Figura 30, para não perder a sequência de 11 dias seguidos.

Registramos AR 3363 quando ela estava posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 22º e Lon: W 55º – veja a Figura 31 – (continuando em direção ao limbo oeste pelo paralelo 22º Sul, como aconteceu pela primeira vez no dia anterior).

Nessa manhã, AR 3363 apresentava o mesmo tamanho do dia anterior, ou seja, 720 MH (2.188.800.000 km²). Apresentava também o mesmo número de manchas embarcadas (11). Sua configuração magnética diminuiu um pouco a complexidade e voltou a ser como em 13 e 14 de julho de 2023, ou seja, $\beta-\delta$, caracterizada como um grupo de manchas solares de classificação magnética bipolar geral ou beta, mas que contém uma (ou mais) mancha do tipo delta, com umbra de polaridade oposta em uma única penumbra.

3.12 Décimo segundo dia: 17 de julho de 2023

No início da tarde de 17 de julho de 2023, a região ativa AR 3363 começou a se despedir do hemisfério visível do Sol – podemos ver com mais detalhes na Figura 32, pois já estava posicionada bem próxima do limbo sudoeste solar, nas coordenadas heliográficas Lat: S 22º e Lon: W 70º. A Figura 33 representa a cromosfera no referido



Figura 32: Fotosfera (disco solar visível) em 17 de julho de 2023, 14:02:08 (17:02:08 UT). No destaque, a região ativa AR 3363 já bem próxima ao limbo sudoeste (Lat: S 22° e Lon: W 70°), se despedindo do hemisfério visível. As demais regiões ativas presentes nessa oportunidade, também são apresentadas.



Figura 33: Cromosfera em 17 de julho de 2023, 14:41:32 (17:41:32 UT).

dia.

Sua configuração magnética continuava como a do dia anterior ($\beta-\delta$), porém seu tamanho diminuiu um pouco, de 720 MH no dia anterior, para 700 MH ou 2.128.000.000 km², o que equivale a cerca de 4,1 vezes a superfície total da Terra. O número de manchas embarcadas baixou para 10 (1 a menos do que no dia anterior).

3.13 Décimo terceiro dia: 18 de julho de 2023

Na manhã de 18 de julho de 2023, no momento do registro do Sol, a região ativa AR 3363 já estava quase “de perfil”, devido à sua posição que começava a adentrar o limbo sudoeste solar – con-

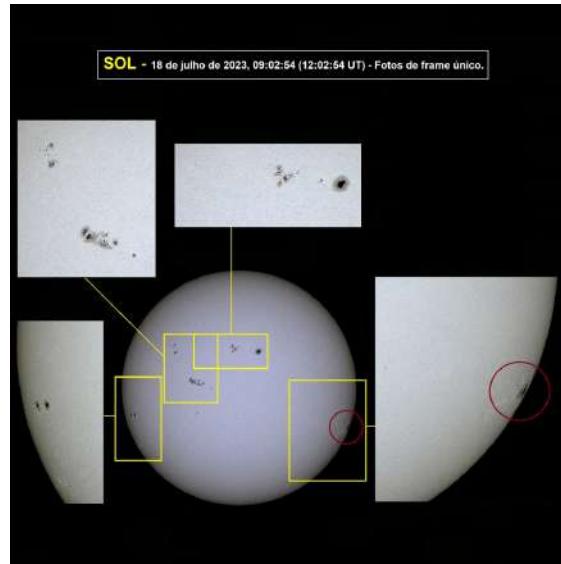


Figura 34: Fotosfera do Sol na manhã de 18 de julho de 2023, mostrando várias regiões ativas presentes naquela data, além de AR 3363 já quase atravessando o limbo sudoeste solar. Disco solar registrado em 18 de julho de 2023, 09:02:54 (12:02:54 UT).



Figura 35: O hemisfério solar visível apresentando (no detalhe) um minúsculo pedaço da região ativa AR 3363, que se encontrava além do limbo sudoeste solar, nas coordenadas heliográficas Lat: S 25° e Lon: W 90°. Várias outras regiões ativas também estavam presentes na fotosfera no disco visível, continuando a rotatividade dinâmica de manchas solares, do atual ciclo solar número 25.

forme evidenciado nas Figuras 34 e 35, pois estava posicionada nas coordenadas heliográficas Lat: S 25° e Lon: W 77°. Nessa oportunidade, AR 3363 abandonou o paralelo Sul 22°, que mantinha percorrendo desde o dia 15/07/2023, descendo para o paralelo Sul 25°.

Sua classificação magnética continuava definida como aquela dos dois dias anteriores (β -



Figura 36: Cromosfera em 18 de julho de 2023, 09:17:12 (12:17:12 UT), mostrando no detalhe a região ativa AR 3363 quase adenetrando o limbo sudoeste solar, posicionada nas coordenadas selenográficas Lat: S 25º e Lon: W 77º. Note no detalhe, a explosão solar relatada no parágrafo anterior, quando houve tempestade de radiação e ejeção de massa coronal.

δ ou beta - delta).

O tamanho de AR 3363 diminuiu consideravelmente em relação ao dia anterior estimado em 390 MH ou 1.185.600.000 km², equivalendo a 2,3 vezes a superfície total do planeta Terra. A quantidade de manchas solares embarcadas reduziu-se para apenas 3 (sete a menos que no dia anterior).

Como novidade nessa data, a região ativa AR 3363 protagonizou uma grande explosão, causando uma forte tempestade de radiação solar por quase 4 horas, que produziu ejeção de massa coronal. Uma enorme quantidade de partículas carregadas magneticamente (gás ionizado ou plasma) foi lançada para o espaço. A Figura 36 representa também a ejeção de massa coronal.

A tempestade de radiação solar interferiu em algumas transmissões de rádio de alta frequência da Terra, mas não gerou maiores transtornos em nosso planeta, haja visto que AR 3363 não se encontrava direcionada para a Terra nessa data, pois já estava posicionada praticamente adenetrando o limbo sudoeste solar.

3.14 Décimo quarto e último dia: 19 de julho de 2023

No último dia de observação e registro da região ativa AR 3363, nosso alvo já havia trans-



Figura 37: Fotosfera solar na manhã de 19 de julho de 2023, mostrando no detalhe, resquícios da região ativa AR 3363 que já havia transposto o limbo sudoeste solar. Várias outras regiões ativas de manchas solares também estavam presentes no disco solar visível nessa oportunidade.



Figura 38: A cromosfera e o adeus a região ativa de manchas solares AR 3363, que em 19 de julho de 2023, 12:00:20 (15:00:20 UT), já havia transposto o limbo solar sudoeste e mostrava apenas (no detalhe) um leve resquício de sua presença final. Acompanhamos e registramos AR 3363 por 14 dias consecutivos.

posto o limbo solar sudoeste com quase a totalidade de seu corpo. Somente uma mínima pista (resquícios) de sua presença mostrava-se timidamente naquele ponto limítrofe do limbo sudoeste lunar – Figuras 35 e 37, nas coordenadas Lat:

S 25º e Lon: W 90º. A Figura 38 representa o último resquício da região AR 3363.

O número de manchas solares embarcadas em AR 3363 manteve-se em 3 unidades, como no dia anterior.

O tamanho de AR 3363 foi estimado em 380 MH ou 1.155.200.000 km², o que corresponde a 2,2 vezes a superfície total do planeta Terra.

Sua classificação magnética tornou-se nada complexa e foi definida nessa oportunidade como do tipo α (alfa), o que significa um grupo de manchas solares unipolar.

4 Conclusão

Tivemos o privilégio de acompanhar e registrar a região ativa de manchas solares por 14 dias consecutivos, desde seu surgimento no limbo sul-oeste em 06/07/2023 até o seu desaparecimento no limbo sudoeste em 19/07/2023.

Nesses 14 dias dedicados à observação do Sol, tivemos a oportunidade de testemunhar os aparecimentos e desaparecimentos de muitas outras regiões ativas de manchas solares, que fizeram parte integrante do dinâmico e rotativo ciclo número 25 do Sol.

Com isso, podemos afirmar:

- Com a observação solar, é possível duplicar o período dedicado às atividades astronômicas.
- O Sol nos apresenta “dois mundos” a serem observados e registrados, baseados no filtro utilizado (Luz visível ou H-Alpha): a fotosfera e a cromosfera. Cada uma dessas camadas possui suas características próprias e belas formações específicas.
- O Sol possui uma dinâmica evolutiva em suas formações, que surgem, se modificam e desaparecem ao longo de horas ou dias. Dito isto, não é possível criar um mapa do Sol, como fazemos com a Lua, onde aparecem suas crateras, cordilheiras, mares, etc.
- Ao longo dos 14 dias da jornada de AR 3363 pelo hemisfério solar visível, acompanhamos as alterações nos parâmetros de sua configuração estrutural.

Parâmetros estruturais como o tamanho (área ocupada), o número de manchas embarcadas, as diversas classificações magnéticas apresentadas e os posicionamentos diários de AR 3363 nas coordenadas heliográficas ao longo do disco solar, tudo isso foi testemunhado e registrado ao longo de 14 dias ininterruptos.

Sobre os autores

Vinícius Queiroz (vinicius.alessandro@aluno.ufop.edu.br) é aluno do curso de graduação Bacharelado em Física pela Universidade Federal de Ouro Preto, além disso é integrante do Projeto de Extensão “Divulgando Astronomia de Ouro Preto ao litoral do Espírito Santo” sob a orientação do Professor Dr. Hermano Velten (hermano.velten@ufop.edu.br), docente do Departamento de Física e docente do programa de pós-graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação PPGCOSMO/UFES.

Ricardo Tolentino (vaztolentino@gmail.com) é Mestre em Tecnologia com ênfase em Manufatura Integrada por Computador pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, possui Pós-Graduação em Análise de Sistemas de Informação e Metodologia do Ensino Superior pela União de Negócios Administrativos (UNA) e Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy. Foi Diretor da Faculdade de Ciências Empresariais da Universidade FUMEC onde atuou também como docente em disciplinas dos cursos de graduação e pós-graduação Lato Sensu.

Referências

- [1] S. K. Solanki, *Sunspots: an overview*, The Astronomy and Astrophysics Review **11**, 153 (2003).
- [2] K. R. Lang e K. R. Lang, *Essential astrophysics* (Springer, 2013).
- [3] M. I. Pishkalo, *On polar magnetic field reversal in solar cycles 21, 22, 23, and 24*, Solar Physics **294**(10), 137 (2019).

- [4] D. H. Hathaway, *The solar cycle*, Living reviews in solar physics **12**, 1 (2015).
- [5] K. de Souza Oliveira Filho e M. de Fátima Oliveira Saraiva, *Astronomia e astrofísica* (Livraria da Física, 2014). Disponível em <https://books.google.com.br/books?id=FhDsJwEACAAJ>.
- [6] H. Svensmark, *Cosmic rays and the biosphere over 4 billion years*, Astronomische Nachrichten: Astronomical Notes **327**(9), 871 (2006).
- [7] S. Smerd, *Radio-frequency radiation from the quiet Sun*, Australian Journal of Chemistry **3**(1), 34 (1950).
- [8] S. G. Ryan e A. J. Norton, *Stellar evolution and nucleosynthesis* (Cambridge University Press, 2010).
- [9] M. Calcina, *A Dynamic Geomagnetic Field Model*, Revista Boliviana de Física **15**(15), 44 (2009).
- [10] S. Hanasoge, L. Gizon e K. R. Sreenivasan, *Seismic sounding of convection in the Sun*, Annual Review of Fluid Mechanics **48**, 191 (2016).
- [11] R. Howe et al., *Dynamic variations at the base of the solar convection zone*, Science **287**(5462), 2456 (2000).
- [12] J. R. Cecatto, *O SOL*, Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica **9** (2006).
- [13] P. Almeida e J. Gregorio-Hetem, *Aspects of the Sun observed at different spectral ran-*ges, Revista Brasileira de Ensino de Física **44** (2021).
- [14] P. Sweet, *Mechanisms of solar flares*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **7**(1), 149 (1969).
- [15] W. D. Pesnell e K. H. Schatten, *An early prediction of the amplitude of solar cycle 25*, Solar Physics **293**(7), 112 (2018).
- [16] H. Çakmak, *A digital method to calculate the true areas of sunspot groups*, Experimental Astronomy **37**, 539 (2014).
- [17] A. V. Mordvinov et al., *The reversal of the Sun's magnetic field in cycle 24*, arXiv preprint arXiv:1602.02460 (2016).
- [18] L. A. Upton e D. H. Hathaway, *An updated solar cycle 25 prediction with AFT: The modern minimum*, Geophysical Research Letters **45**(16), 8091 (2018).
- [19] R. H. Cameron, J. Jiang e M. Schuessler, *Solar cycle 25: another moderate cycle?*, The Astrophysical Journal Letters **823**(2), L22 (2016).
- [20] R. Howard, *The rotation of the sun*, Scientific American **232**(4), 106 (1975).
- [21] Cambridge University Press, *Magnetic Classification of Active Regions*, in *Structure and Development of Solar Active Regions*, Cambridge University Press (Springer Netherlands, 1968), vol. 35, 33–42.

A ocultação de Marte pela Lua em 06 de setembro de 2020: contribuições da ciência aberta para a pesquisa em astronomia

Maria Paula de Freitas Novais¹ e Ricardo José Vaz Tolentino²

¹Instituto Federal de Minas Gerais

²Observatório Lunar Vaz Tolentino

Resumo

A astronomia desperta o interesse e cativa a imaginação humana devido à sua conexão com o que há de mais profundo nas indagações existenciais que habitam a mente. A beleza e a grandiosidade dos eventos celestes faz brilhar os olhos e, por essa razão, existem muitas pessoas que dedicam o seu tempo e recursos a explorar e capturar os eventos astronômicos. Neste artigo descrevemos a ocultação de Marte pela Lua, que foi capturada no dia 6 de setembro de 2020 pelo Observatório Lunar Vaz Tolentino. Discutiremos também de que maneira essa paixão pela ciência pode contribuir com o trabalho de pesquisadores da área e como o acesso aberto pode ajudar nesse processo.

Abstract

Astronomy arouses interest and captivates the human imagination due to its connection with the deepest existential inquiries that inhabit the mind. The beauty and grandeur of celestial events sparkle the eyes, and for this reason, there are many people who dedicate their time and resources to explore and capture astronomical events. In this article, we describe the occultation of Mars by the Moon, which was captured on September 6, 2020, by the Vaz Tolentino Lunar Observatory. We will also discuss how this passion for science can contribute to the work of researchers in the field and how open access can aid in this process.

Palavras-chave: astronomia, ocultação lunar, astrofotografia, ciência cidadã, acesso aberto.

Keywords: astronomy; lunar occultation, astrophotography, citizen science, open access.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43581](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43581)

1 Introdução

A astronomia é a mais antiga das ciências naturais, uma vez que a observação dos astros está intrinsecamente ligada a uma noção de pertencimento ao cosmo. Ela desempenhou um papel fundamental em contextos históricos, influenciando a maneira como a sociedade vive e se organiza até os dias de hoje. Além disso, essa ciência desperta o interesse de entusiastas em todo o mundo, possibilitando que a captação de dados observacionais seja realizada por pessoas interessadas no assunto. Por meio de sites que apoiam *Citizen Science* – traduzido do inglês como Ciência Cidadã, e artigos *Open Data*¹ se consolida o termo *Open Science*,² que abre as pesquisas ci-

entíficas produzidas na academia à comunidade, que pode colaborar para a coleta e análise dos chamados *Big Data* – uma enorme e diversa coleção de dados estruturados, semiestruturados e não estruturados em constante expansão.

De acordo com a Rede de Astronomia Observacional (REA Brasil)³ a ocultação é o fenômeno de desaparecimento temporário de um astro devido à passagem de outro com maior diâmetro aparente à sua frente, a partir de um determinado ponto de vista. Ou seja, a visualização do fenômeno depende diretamente da posição do observador, seja no globo terrestre ou fora dele – a olho nu,

¹Dados abertos, acessíveis; licenciados sob uma licença aberta

²Ciência aberta; são políticas e ações voltadas para a disseminação do conhecimento com visão à inovação e

avanço social, cultura, econômico, etc.

³www.rea-brasil.org

com os telescópios terrestres⁴ e espaciais.⁵ Historicamente as occultações foram responsáveis pela descoberta de várias particularidades no universo observável, como a dos anéis de Urano em 1977, a partir da occultação de uma estrela [2]. É importante ter em vista que elas apresentam várias possibilidades, ou seja, podem ser lunares, planetárias, devido a asteroides, cometas e objetos transnetunianos.⁶ Durante o processo de occultação a intensidade da luz de um astro observado diminui devido à absorção atmosférica, revelando objetos que podem estar sendo ofuscados pelo brilho desse astro. Para além das constatações observacionais, o eclipse solar observado no Brasil, na cidade de Sobral (CE) e na Ilha do Príncipe na costa oeste da África em 29 de maio de 1919 foi a comprovação experimental da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein [4].

A observação sistemática da natureza, de maneira geral, sempre levou a humanidade a novas descobertas sobre o lugar de onde vivemos e vivemos, e as occultações, em específico, proporcionam uma visualização de detalhes que podem passar despercebidos. Neste artigo, veremos quais são os processos envolvidos em uma occultação planetária feita pela Lua, as fotos foram capturadas no Observatório Lunar Vaz Tolentino,⁷ em Belo Horizonte (MG), no dia 06 de setembro de 2020. Além disso, também discutiremos de que maneira a participação da sociedade no processo de captação e análise de dados pode impactar positivamente no trabalho de pesquisadores. Por fim, veremos também alguns projetos e fontes que fazem com que essa participação seja eficiente.



Figura 1: Marte antes de imergir. Créditos: R. J. V. Tolentino (2020).

2 A occultação de Marte pela Lua

Nesta seção o leitor poderá visualizar de que maneira os dados de uma occultação lunar são capturados e tratados, bem como quais são as informações relevantes para a verificação do que foi registrado a partir de outras fontes.

As partes interessantes no processo de uma occultação feita pela Lua ocorrem, primeiramente, quando o objeto é escondido da nossa visão—desaparecimento ou imersão e, segundamente, quando ele surge novamente—reaparecimento ou emersão.

Na Fig. 1 Marte está à esquerda, antes de iniciar o seu processo de imersão na Lua. Na figura seguinte (Fig. 2), Marte se encontra à direita, após completar o processo de emersão da Lua.

No início do belo evento astronômico da occultação de Marte pela Lua ocorrido em 06 de setembro de 2020, nosso satélite natural (Fig. 3) estava cerca de 405.168 km de distância da Terra e evoluindo em sua fase minguante, apresentando-se 86,4% iluminada, com 17,89 dias de lunação, magnitude em $-11,5$ e diâmetro aparente de $29,49'$.

Do nosso ponto de vista no Observatório Lunar Vaz Tolentino em Belo Horizonte (LAT: $19^{\circ} 55' 40.6''$ S, LON: $043^{\circ} 55' 04.1''$ W, ALT: 898m), o início do desaparecimento de Marte, contato das bordas, aconteceu às 00:01:32 (03:01:32 UT), no limbo sudoeste lunar, na região da grande cratera de impacto LAGRANGE (diâmetro: 225 km, profundidade: 2,4 km). Na Fig. 4 é possível vi-

⁴De acordo com a International Occultation Timing Association (IOTA) não é necessário um telescópio com uma abertura muito grande, que seja caro e elaborado, para coletar dados úteis. Um simples refrator de 50mm pode proporcionar uma boa coleta de dados de occultações estelares de 9ª magnitude, por exemplo.

⁵Occultações estelares realizadas por corpos do Sistema Solar e por anéis planetários observadas pelo James Webb Space Telescope [1].

⁶*Trans-Neptunian Objects* (TNOs) os objetos transnetunianos são corpos gelados que orbitam além de Netuno, também são conhecidos como objetos do Cinturão de Kuiper e são os objetos mais distantes do Sistema Solar acessíveis a investigação direta a partir da Terra [3].

⁷www.vaztolentino.com.br

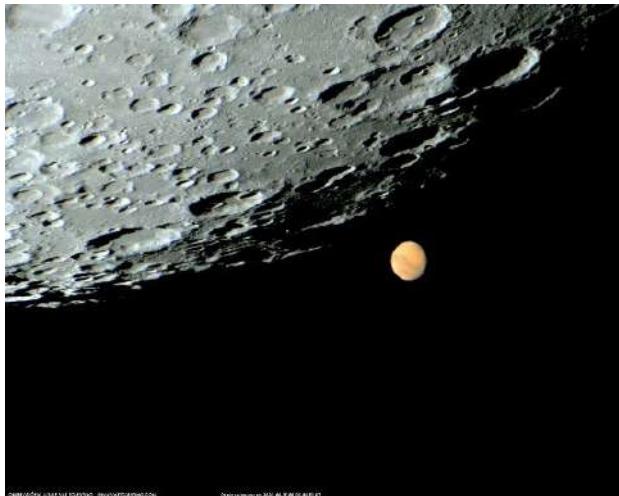


Figura 2: Marte depois de emergir. Créditos: R. J. V. Tolentino (2020).



Figura 4: Contato de Marte com as bordas da Lua. Créditos: R. J. V. Tolentino (2020).



Figura 3: Estado da Lua antes da occultação de Marte. Créditos: R. J. V. Tolentino (2020).



Figura 5: Início da emersão de Marte. Créditos: R. J. V. Tolentino (2020).

sualizar o momento exato em que Marte iniciou a sua occultação. No momento de sua imersão, Marte estava em fase (93,1% iluminado), com magnitude igual a $-1,9$ e diâmetro aparente de $20''$.

3 A emersão de Marte

O reaparecimento de Marte teve início às 00:53:24 (03:53:24 UT), no limbo lunar sudeste, na região da cratera de impacto HELMHOLTZ (diâmetro: 94 km, profundidade: 4,4 km). Nas Figuras 5, 6 e 7 são retratados os estágios da emersão de Marte após a sua occultação, apresentando-se no limite inferior à direita

da Lua.

No momento da emersão, Marte continuava com os mesmos parâmetros anteriores, mas a Lua (Fig. 8) diminuiu sua iluminação e sua distância da Terra, para 86,2% e 403.903 km, respectivamente.

3.1 Reconhecimento internacional

As nossas imagens da occultação de Marte, tanto no evento ocorrido em 09 de agosto de 2020, quanto no evento seguinte ocorrido em 06 de setembro de 2020, foram publicadas nas revistas americanas *Astronomy*⁸ (edições fevereiro/2021 e

⁸www.astronomy.com



Figura 6: Emersão de Marte após occultação lunar. Créditos: R. J. V. Tolentino (2020).

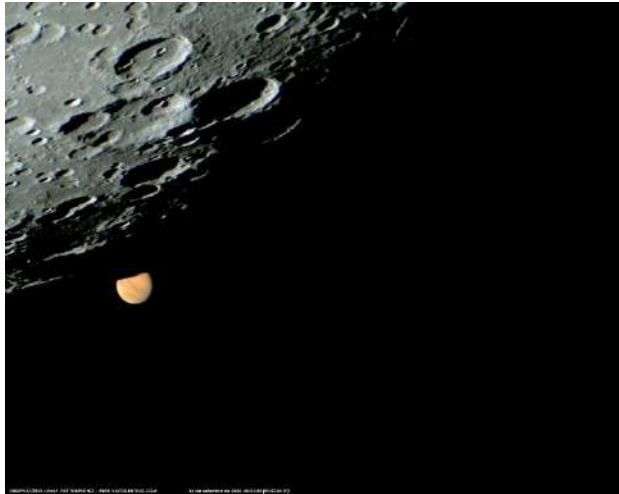


Figura 7: Emersão de Marte após occultação lunar. Créditos: R. J. V. Tolentino (2020).

março /2021) e *Sky & Telescope*⁹ (edição dezembro /2020).

Veremos como última ilustração desse artigo a publicação de uma imagem de nossa autoria, veja Fig. 9, da occultação de Marte em 06 de setembro de 2020, escolhida pela revista britânica *BBC Sky at Night*¹⁰ e colocada como foto do mês na edição de novembro/2020.

Nessa publicação da revista BBC (Fig. 9) — tradução nossa, também estão listados quais foram os equipamentos utilizados, além de dicas úteis para quem se interessar em fazer esse tipo de registro.

⁹<https://skyandtelescope.org/>

¹⁰www.skyatnightmagazine.com



Figura 8: A Lua após a occultação de Marte em 06 de setembro de 2020. Créditos: R. J. V. Tolentino (2020).

4 Open science

O fazer ciência e as descobertas científicas nem sempre foram abertos à sociedade, mesmo com os desafios encontrados na contemporaneidade, o que se observa é que mais pessoas têm acessado os conhecimentos construídos dentro da academia. Esse avanço se dá devido ao desenvolvimento das sociedades científicas desde o século XIX, onde há um movimento em direção a uma ciência mais aberta, do pensamento de domínio público e do paradigma do acesso aberto da segunda metade do século XX [5, 6].

O conceito de ciência aberta depende de como a palavra “aberta” está empregada, ela pode se referir ao processo, ao meio, aos resultados, etc. A ciência aberta é o movimento para fazer a pesquisa científica, dados e a disseminação acessível a todos os níveis de uma sociedade investigadora [6, 7]. Portanto, esse acesso aberto à produtividade de cientistas profissionais pode facilitar a reprodução e a pesquisa colaborativa entre grupos não só dentro das universidades, mas também possibilitar que cidadãos as accessem para desenvolver suas próprias pesquisas dentro de sua área de interesse.

A partir dessa perspectiva, o acesso aberto é um aspecto chave para a ciência aberta. Ele possibilita que qualquer pessoa interessada possa se envolver em atividades acadêmicas, desenvolver seus próprios projetos a partir de bibliografias confiáveis e até contribuir pesquisas em andamento. Os artigos científicos publicados sob

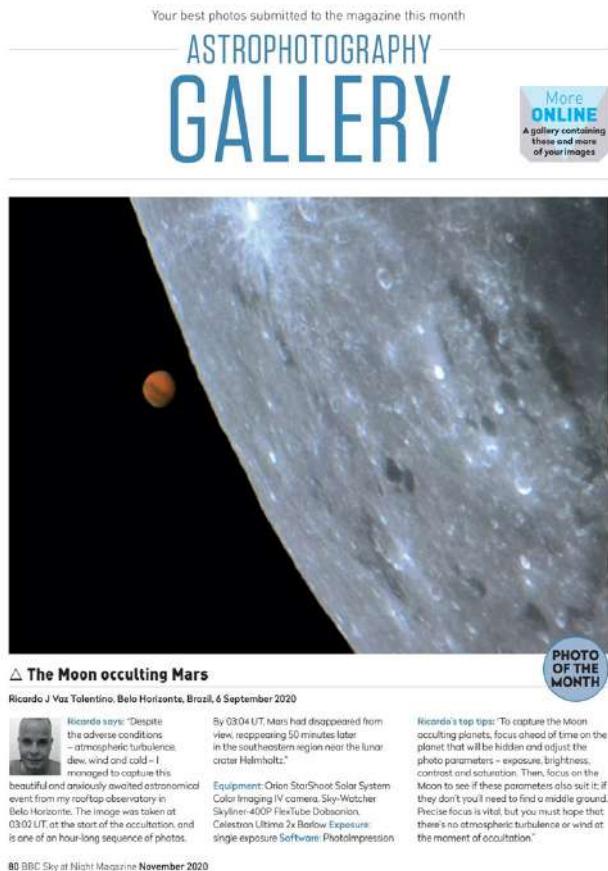


Figura 9: BBC Sky at Night, foto do mês, edição nov. 2020. Ricardo diz: Apesar das condições adversas — turbulência atmosférica, orvalho, vento e frio — eu consegui capturar este lindo e ansiosamente esperado evento astronômico do meu observatório no telhado em Belo Horizonte. A imagem foi tirada à 03:02 UT, no início da oclusão, e se trata de uma sequência de fotos de uma hora de duração. Por volta das 03,04 UT, Marte desapareceu da visão, reaparecendo 50 minutos depois na região sudeste, próximo à cratera lunar Helmholtz. Equipamento: Orion StarShoot Solar System Color Imaging IV camera, Sky-Watcher Skyliner-400P FlexTube Dobsonian, Celestron Ultima 2x Barlow Exposição: exposição única Software: PhotoImpression As principais dicas de Ricardo: Para capturar a Lua ocultando planetas, foque à frente do tempo no planeta que será escondido e ajuste os parâmetros da foto — exposição, brilho, contraste e saturação. Depois, foque na Lua para ver se esses parâmetros também se encaixam: se eles não se encaixarem, você terá que encontrar um meio termo. Um foco preciso é vital, mas você deve torcer para que não haja turbulência atmosférica ou vento no momento da oclusão.

o princípio do acesso aberto são úteis principalmente para outros pesquisadores. Além disso, os dados científicos com acesso aberto também podem ser valiosos para a administração pública, para o governo e para cidadãos conduzindo suas próprias pesquisas, assim como para mídias e ou-

tros [6].

4.1 A ciência cidadã sob o princípio do acesso aberto

Devido ao paradigma do acesso aberto, há uma grande demanda para a participação da sociedade na coleta de dados científicos, existem hoje algumas plataformas que hospedam projetos abertos à cooperação, como Zooniverse¹¹ e SciStarter.¹² Nessas plataformas é possível pesquisar por projetos dentro de áreas como botânica, zoologia, clima, artes, história, literatura, medicina, ciências espaciais, etc. A maioria dos projetos listados nessas plataformas lida com uma elevada quantidade de dados, como o projeto Galaxy Zoo,¹³ que estuda como as galáxias são formadas e precisa de ajuda para classificá-las. Nesse projeto, os cientistas amadores baseiam-se em imagens de galáxias distantes, em um banco de dados, e podem ser os primeiros a ver as galáxias que estão classificando.

Existem ainda redes que envolvem pessoas interessadas no mesmo assunto e as auxiliam em seus projetos por meio das ferramentas disponíveis em seu site, como a IOTA¹⁴ no caso das ocluações. Iniciativas como essas podem fornecer as informações necessárias para a realização desses projetos, como quais são os equipamentos e softwares que melhor se aplicam à captura do fenômeno em questão, ou de que maneira o cientista amador deverá pesquisar as fontes para realizá-la. Sobretudo, para além de sites e softwares, há o cientista profissional, que pode operar diretamente na comunidade de acordo com as necessidades e demandas que surgirem. Por meio da ciência cidadã, o profissional pode ser o responsável por orientar indivíduos que irão contribuir com uma série de pesquisas, e que irão desempenhar um papel ativo nas mudanças do local onde vivem.

Agradecimentos

Agradecimentos ao CNPq e ao professor Dr. Hermano Velten, coordenador do projeto de Di-

¹¹www.zooniverse.org

¹²<https://scistarter.org/>

¹³<https://www.zooniverse.org/projects/zookeeper/galaxy-zoo>

¹⁴<https://occultations.org/>

vulgação da Astronomia de Ouro Preto ao Litoral do Espírito Santo.

Sobre os autores

Ricardo José Vaz Tolentino (vaztolentino@gmail.com) é Mestre em Tecnologia com ênfase em Manufatura Integrada por Computador pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, possui Pós-Graduação em Análise de Sistemas de Informação e Metodologia do Ensino Superior pela União de Negócios Administrativos (UNA) e Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy. Foi Diretor da Faculdade de Ciências Empresariais da Universidade Fundação Mineira de Educação e Cultura (FUMEC), onde atuou também como docente em disciplinas dos cursos de graduação e pós-graduação Lato Sensu.

Maria Paula de Freitas Novais (novaismariap1@gmail.com) é estudante do curso de Licenciatura em Física no Instituto Federal de Minas Gerais, campus Ouro Preto. Ela atua como bolsista do CNPq no projeto Divulgando a Astronomia de Ouro Preto ao Litoral do Espírito Santo, onde desempenha o papel de Apoio à Difusão de Conhecimento. Além disso, colabora com a *Faculty of Science* da Universidade Masaryk, na República Tcheca, mapeando o estado da arte da ciência cidadã na América Latina.

Referências

- [1] P. Santos-Sanz et al., *James Webb Space Telescope observations of stellar occultations by solar system bodies and rings*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **128**(959), 018011 (2016).
- [2] R. G. French et al., *Uranus ring occultation observations: 1977–2006*, *Icarus* **395**, 115474 (2023).
- [3] M. A. Barucci et al., *The Outer Frontiers of the Solar System: Trans-Neptunian Objects and Centaurs*, *The Messenger* **141**, 15 (2010). Disponível em <https://www.eso.org/sci/publications/messenger/toc.html?v=141&m=Sep&y=10>, acesso em fev. 2024.
- [4] M. L. F. Nascimento, *Teoria da relatividade geral-100 anos de uma nova visão de mundo*, *Revista Politécnica* **25**, 12 (2017).
- [5] S. Green, *An Illustrated History of Open Science*, Open Access for Societies – The Wiley Network (2017). Disponível em <https://www.wiley.com/en-us/network/publishing/societies/open-access/an-illustrated-history-of-open-science>, acesso em fev. 2024.
- [6] J. Trojan et al., *Citizen science as a new approach in Geography and beyond: Review and reflections*, *Moravian Geographical Reports* **27**(4), 254 (2019).
- [7] H. Brinken, *Fostering The Practical Implementation Of Open Science In Horizon 2020 And Beyond*, Zenodo (2018).
- [8] S. Albagli, *Ciência aberta em questão* (IBICT Unirio, 2015), 9–25.
- [9] D. T. Machado, *GalileoMobile: inspirando jovens sob o mesmo céu*, *Cadernos de Astronomia* **3**(2), 75 (2022).
- [10] R. Langhi e R. Nardi, *Ensino da astronomia no Brasil: educação formal, informal, não formal e divulgação científica*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **31**(4), 4402 (2009).

Lua, gigante cósmico! A Lua mais próxima da Terra (perigeu) e o Sol mais distante (afélio da Terra)

Luiz Ravell Andre Antonio Dias¹ e Ricardo José Vaz Tolentino²

¹Universidade Federal de Ouro Preto

²Observatório Lunar Vaz Tolentino

Resumo

O artigo explora a relação entre o Sol e a Lua, apesar de suas distâncias e tamanhos diferentes. Destaca as órbitas elípticas que causam variações nos tamanhos aparentes desses astros, levando a eventos como eclipses. Em julho de 2023, houve a coincidência de a Terra estar mais distante do Sol e a Lua mais próxima, resultando em um tamanho aparente lunar maior. O estudo destaca características físicas e orbitais para compreender tais fenômenos astronômicos.

Abstract

The article explores the relationship between the Sun and the Moon, despite their differing distances and sizes. It emphasizes the elliptical orbits causing variations in their apparent sizes, leading to events like eclipses. In July 2023, there was a coincidence of Earth being farther from the Sun and the Moon being closer, resulting in a larger apparent lunar size. The study highlights physical and orbital characteristics to comprehend such astronomical phenomena.

Palavras-chave: Lua, perigeu lunar, afélio da Terra.

Keywords: Moon, lunar perigee, Earth aphelion.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43582](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43582)

1 Introdução

Desde a antiguidade, o Sol e a Lua desempenham papéis essenciais na contagem do tempo e na percepção do céu como um relógio natural. Sua presença foi crucial para o êxito da agricultura e a sobrevivência da humanidade, moldando profundamente o cotidiano e a cultura ao longo da história. [1].

Apesar de o Sol estar aproximadamente 400 vezes mais distante da Terra do que a Lua, ele também é cerca de 400 vezes maior do que ela. Essa relação possibilita a ocorrência de eclipses totais. No entanto, devido às órbitas elípticas da Terra em torno do Sol e da Lua em torno da Terra, a distância desses astros varia, afetando seus tamanhos aparentes. Este trabalho explora não apenas esses dois corpos celestes, mas também a coincidência de eventos em julho de 2023, quando a Terra estava mais afastada do Sol e a Lua mais próxima, resultando em um tamanho aparente da Lua significativamente maior que o do Sol por al-

guns dias. O estudo aborda características físicas e orbitais para explicar esses fenômenos.

2 A Lua

A Lua é um dos mais importantes objetos do céu noturno para a humanidade. Sua formação em estudos recentes feitos com amostras de zircão coletadas pela Apollo 14 estima sua idade em 4,51 bilhões de anos [2]. Nossa Lua traz consigo uma história de um passado caótico de formação geológica em sua superfície, com estruturas antigas ainda preservadas pela ausência de atmosfera e erosão quase nula. Tal passado a torna a visão telescópica mais rica em detalhes aqui da Terra, com incontáveis alvos em sua rica topografia. É o nosso mais acessível registro da formação e evolução do sistema solar [2]. Podemos encontrar vários mares de lava escura, cordilheiras, montanhas, incontáveis crateras de impacto de todos os tamanhos, bem como crateras secundárias, fan-

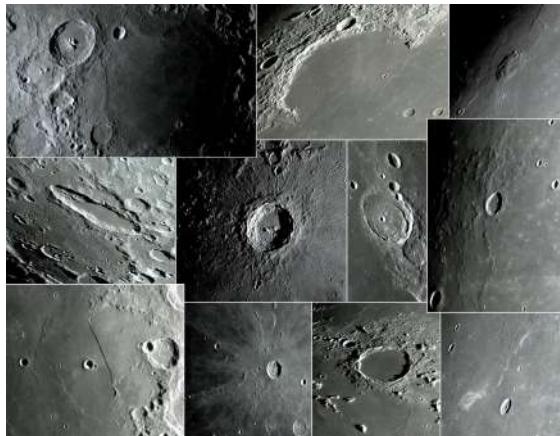


Figura 1: Algumas das diversas e belas formações presentes no rico relevo lunar.

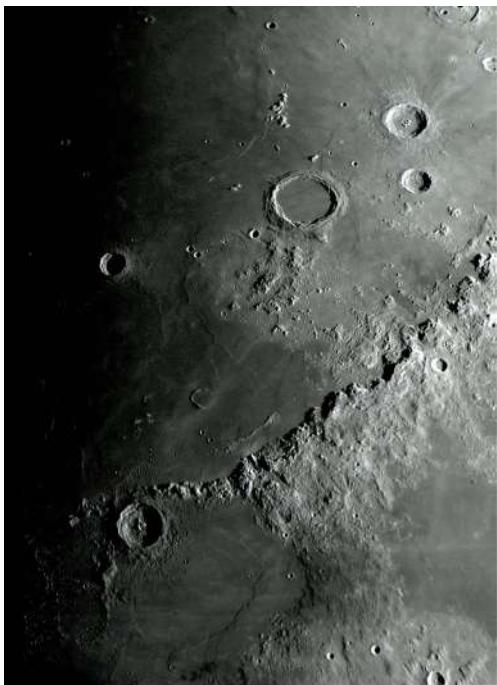


Figura 2: Região da grande Cratera *Archimedes* (diâmetro: 81,04 km, profundidade: 1,6 km) e da longa cordilheira dos Montes *Apenninus* (extensão: 401 km, altitude máxima: 5,4 km), com a Cratera *Eratosthenes* (diâmetro: 58 km, profundidade: 3,43 km) posicionada no extremo sul da cordilheira. Capturado em 28/05/2023 às 19:45:20 (22:45:20 UT).

tasmas e vulcânicas. Da mesma forma, ela possui numerosos canais, escarpas, cristas rugosas, vulcões extintos e muito mais, tudo isso facilmente observado por telescópios terrestres, como vemos nas Figuras 1 e 2.

A selenografia é um ramo que estuda as características físicas da superfície lunar. Quando um selenógrafo observa a Lua hoje, ele enxerga



Figura 3: Os movimentos da Lua produzem mudanças de luz e sombras, que alteram dramaticamente as feições de suas formações. A bela baía do *Sinus Iridum* (diâmetro: 259 km) em três noites consecutivas.



Figura 4: A grande Cratera *Schickard* (diâmetro: 206 km, profundidade: 3,08 km) em três noites consecutivas.

as consequências de incontáveis eventos ligados a impactos, vulcanismo e tectonismo dos últimos 4,51 bilhões de anos, alguns gravados e preservados até hoje. Isso nos oferece uma ideia de como era o sistema solar na época em que a Lua e nosso planeta foram formados. Estima-se que o sistema Terra-Lua se formou entre 50 a 70 milhões de anos após a formação do sistema solar [2].

Falamos das variações de inúmeros objetos que conseguimos ver na Lua. Agora, adicione uma dinâmica de iluminação nesse sistema, alternando entre luz e sombra nos crepúsculos lunares, causados pelo nascer e pôr do Sol sobre seu relevo. Isso torna o sistema mais complexo, de forma que dificilmente você verá a mesma coisa ao olhar novamente. À medida que o tempo passa e a Lua rotaciona em seu eixo, o ângulo de luz solar incidente nas crateras muda, e como consequência, temos sombras. Essas sombras evidenciam o relevo lunar, mostrando estruturas que só podem ser observadas da Terra dessa maneira. Isso possibilita estudarmos o relevo lunar sem sair do nosso planeta. Dessa forma, se você quer informações de uma região, é importante observar nos crepúsculos. Observe os exemplos dessa diferença nas Figuras 3 e 4. Dessa forma, a Lua não é tão monótona.



Figura 5: Marte se aproximando para ser occultado pela Lua em 06/09/2020, 00:02:34 (03:02:34 UT). Esta imagem foi escolhida como “Foto do Mês” pela revista britânica “*BBC Sky At Night Magazine*”, em sua edição de novembro de 2020.

Também é possível observar e registrar outros incríveis fenômenos, como as occultações de planetas nas Figuras 5 e 6, occultação de estrelas, os eclipses, como o lunar na Figura 7, os intensos clarões dos impactos de meteoritos e as pareidolias. Há também misteriosos e efêmeros TLP (*Transient Lunar Phenomena*), que significa fenômeno lunar transitório. São caracterizados por brilhos anormais ou mudança de cores na superfície lunar, cintilações ou até mesmo flashes, todos eventos temporários, geralmente indicando alguma manifestação vulcânica remanescente ou escape de gases.

A Lua também oferece a possibilidade de realizar descobertas surpreendentes que qualquer observador atento pode fazer. Inclusive, certas formações não catalogadas pela *International Astronomical Union* (IAU), conhecidas como “crateras fantasmas” na Figura 8. Muitas dessas crateras só podem ser vistas utilizando o contraste de luz e sombra mencionado anteriormente.

Pareidolia ocorre quando associamos um padrão visual a algo que reconhecemos, como quando as pessoas veem animais e objetos nas nuvens. Com a Lua, não é diferente. Com sua ampla variação de relevo, é fácil imaginar formas familiares nesses padrões, como a cabeça de lobo na Figura 9 e o lunar X nas Figuras 10 e 11. Muitas dessas pareidolias só são perceptíveis durante o crepúsculo, aproveitando o contraste entre luz

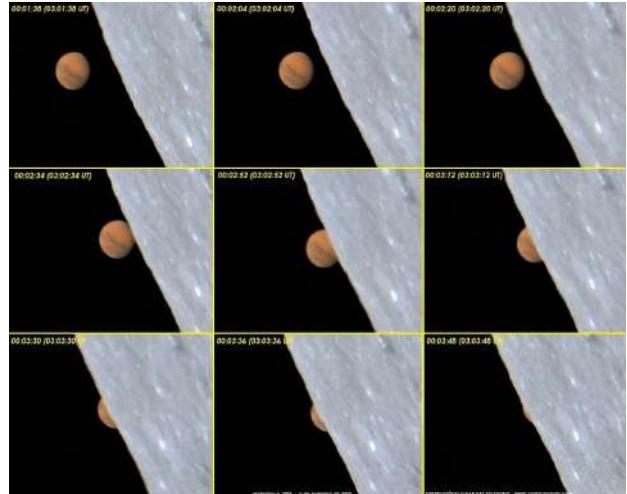


Figura 6: Sequência de imersão ou desaparecimento de Marte em seu processo de occultação pela Lua em 06/09/2020. Esta composição foi destaque na seção “*Reader Gallery*” da revista americana *Astronomy*, na edição de março de 2021.



Figura 7: Primeira metade do Eclipse Lunar Total, ocorrido de 27 para 28 de setembro de 2015.

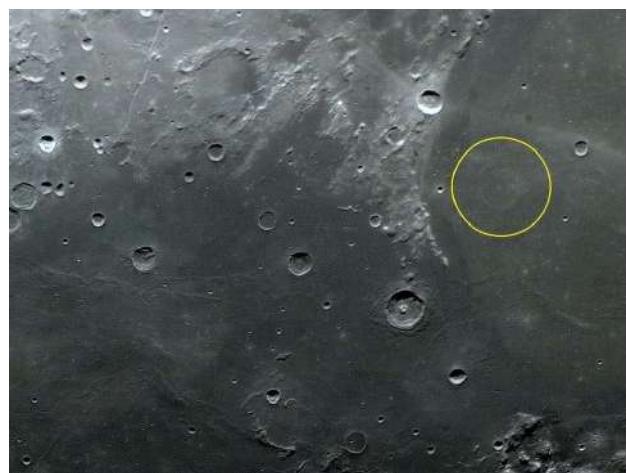


Figura 8: Provável cratera fantasma (não catalogada) próxima da orla sul do Mare Serenitatis (Norte para direita nesta foto). A suposta cratera fantasma foi descoberta pelo autor em 22/02/2011, 02:08:06 (05:08:06 UT). Esta imagem foi publicada no website americano *Lunar Photo Of the Day* (LPOD) em 13 de outubro de 2011.

e sombra.



Figura 9: A intrigante pareidolia da “cabeça de lobo”, resultante da “dupla dinâmica” de luz e sombra, foi descoberta por Vaz Tolentino em 09 de junho de 2014.



Figura 10: Pareidolia lunar X, que só pode ser vista nos limites dos crepúsculos.

Como as pareidolias são fatores psicológicos, a cultura influencia diretamente no padrão que criamos com base no que conhecemos. Um exemplo claro disso são os gregos antigos e os tupi-guarani. Conhecemos bem a cultura grega, mas poucos conhecem a tupi-guarani. Esse povo desenvolveu ferramentas para ler o céu, de forma que conseguiam prever épocas ideais de plantio, colheita, caça, e até mesmo eclipses, utilizando o Gnômon, que é uma haste cravada no chão, onde observavam a sombra projetada pelo sol [3]. Ao comparar as constelações dessas duas culturas, mesmo sendo as mesmas estrelas, esses diferentes povos as associavam a mitos e enxergavam padrões muito distintos. De modo semelhante, os padrões na lua podem ser interpretados de inúmeras formas, sendo dois bem famosos o coelho lunar e São Jorge e o dragão. Uma pareidolia bem inusitada é aquela que lembra o formato do mapa do Brasil, localizado na cratera C. Mayer D



Figura 11: Pareidolia do lunar X com ampliação.



Figura 12: A pareidolia do mapa do Brasil na cratera C. Mayer D.

(Figura 12), cujo padrão foi descoberto por Vaz Tolentino.

3 O Sol

A estrela mais próxima da Terra, o Sol, é a fonte primária de energia para a vida. Este gigante solar acumula quase toda a massa do sistema solar, evitando o colapso devido ao equilíbrio hidrostático entre a força gravitacional e a pressão termodinâmica [4]. Composto principalmente de hidrogênio e hélio, o Sol possui frações muito pequenas de outros elementos. [1]. O Sol possui seis estruturas principais: Cromosfera, Fo-

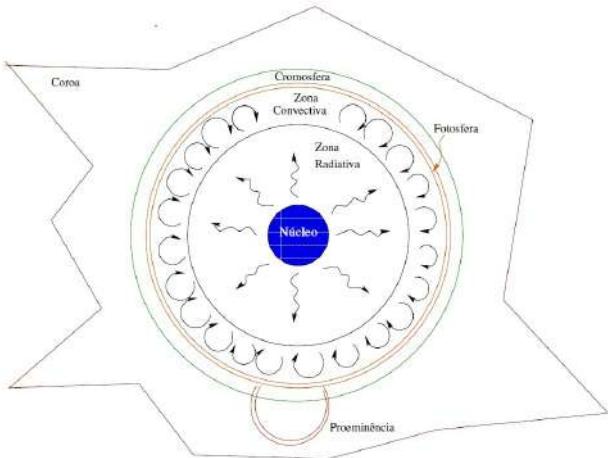


Figura 13: As 6 principais estruturas do Sol. [1].

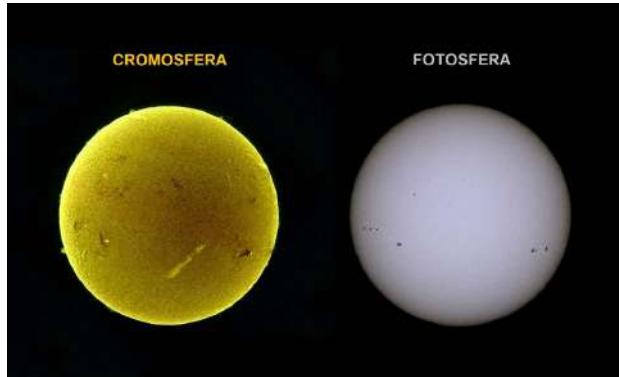


Figura 14: O Sol foi fotografado na manhã de 02 de junho de 2023. Foram utilizados um filtro H-Alpha para capturar a cromosfera e um filtro Baader Luz Visível para a fotosfera.

tosfera, Zona Convectiva, Zona Radiativa, Núcleo e a Coroa. Enquanto a superfície do Sol é composta pela camada conhecida como fotosfera, a atmosfera solar é formada pela cromosfera e pela coroa. O interior do Sol é composto pelas camadas convectiva e radiativa, além do núcleo. [1]. Observe o modelo da estrutura solar na Figura 13 e as fotografias da cromosfera e fotosfera na Figura 14.

A fonte de energia do Sol provém das reações termonucleares que ocorrem em seu núcleo, onde os núcleos de hidrogênio (prótons) são fundidos a uma temperatura de 10 milhões de Kelvin, resultando na formação de átomos de hélio [1]. Nesse processo, a massa final é menor que a inicial, e como sabemos, massa é energia. Na Figura 15, observamos que a fusão nuclear também gera como subprodutos pósitrons, neutrinos e muita

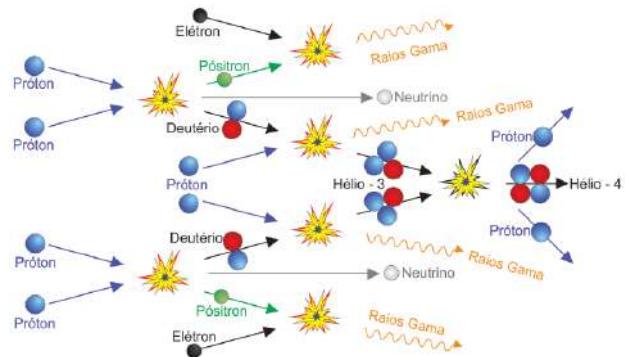


Figura 15: Simplificação do processo de fusão nuclear de núcleos de prótons em hélio no núcleo do sol. [1]

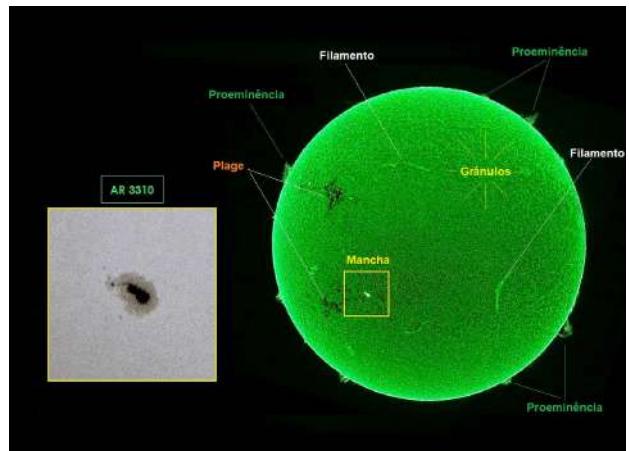


Figura 16: O Sol e suas formações dinâmicas e efêmeras foram fotografados na tarde de 21 de maio de 2023, com destaque para a Região Ativa de Manchas Solares AR 3310. A imagem foi capturada utilizando um filtro de Luz Visível (esquerda - Fotosfera) e um filtro H-Alpha (direita - Cromosfera).

radiação gama.

De todos os fenômenos fotosféricos que podemos ver na Figura 16, as manchas solares são as com maior destaque, sendo algumas vezes visíveis a olho nu, registradas na China já em 28 a.C. [1] e sendo observadas no mesmo há 1000 a.C. [5]. As manchas são regiões mais frias e por isto mais escuas, apresentando aproximadamente 2000 K, em comparação com a superfície solar, que tem 5780 K. Essa diferença de temperatura se relaciona com uma menor quantidade de energia emitida, e isso se dá pelo fato de manchas solares se formarem em regiões com campos magnéticos cerca de 1000 vezes mais intensos que seu entorno. Esse campo acaba bloqueando parte da energia de chegar à superfície, ao interromper esse fluxo, a região se torna mais fria que seus arredores [5].

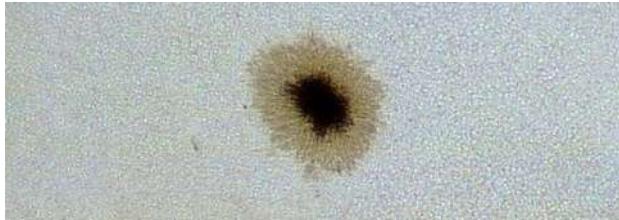


Figura 17: Mancha Solar da Região Ativa AR 2546, fotografada na manhã de 18 de março de 2016.



Figura 18: A enorme Região Ativa de Manchas Solares AR 3354 foi fotografada na manhã de 29 de junho de 2023. No momento do registro, essa Região Ativa apresentava uma área equivalente a 5,3 vezes a superfície total do planeta Terra.

As manchas solares (Figura 17) podem persistir por dias, semanas ou até meses, à medida que percorrem e circundam a superfície solar. Durante esse período, elas evoluem, sofrendo mutações em seus formatos, tamanhos (expansão e/ou contração) e configurações magnéticas. [1] Esse dinamismo reflete a complexidade das interações magnéticas solares.

O Sol possui um ciclo que ocorre em um intervalo de aproximadamente 11 anos onde altera entre fases de máximo e mínimo solar, durante as quais a intensidade, o número das manchas e as latitudes onde aparecem variam. [5]. Na Figura 18 vemos uma grande mancha solar e na Figura 19 podemos observar pelo menos 6 delas. Ambas as fotos foram tiradas relativamente próximas ao pico do ciclo solar 25.

A estrutura visual de uma mancha solar é composta por sua região central mais escura, conhecida como umbra, circundada pela região menos escura chamada penumbra [1]. A área de abrangência de uma mancha solar pode ser várias vezes maior do que a superfície total do planeta Terra. Observe a Figura 20 que mostra o contraste da umbra e da penumbra sobre a superfície solar.

O Sol também serve como um amplo pano de

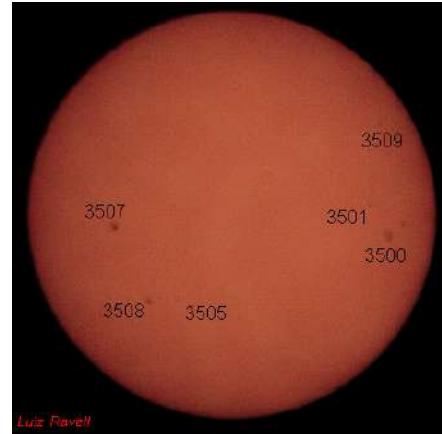


Figura 19: Manchas solares capturadas na manhã do dia 02/12/23. Foram usados somente uma câmera e um filtro solar simples. Mapeamento das manchas feito comparando essa foto com dados obtidos no mesmo dia pelo NASA SDO spaceweatherlive.com.

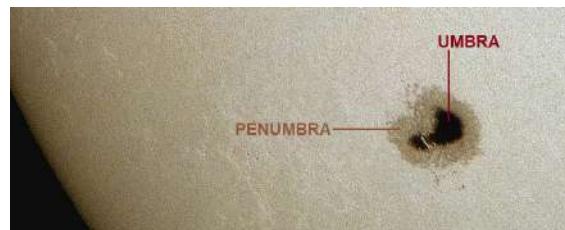


Figura 20: Região Ativa de Manchas Solares AR 3363, composta por apenas 2 manchas. Fotografada na manhã de 09 de julho de 2023.



Figura 21: Trânsito de Mercúrio pelo hemisfério visível do Sol em 09/05/2016, às 09:20:35 (12:20:35 UT).

fundo para os belos espetáculos de trânsitos dos planetas Vênus e Mercúrio através de seu enorme hemisfério visível, como na Figura 21, além de oferecer a oportunidade de observar eclipses.

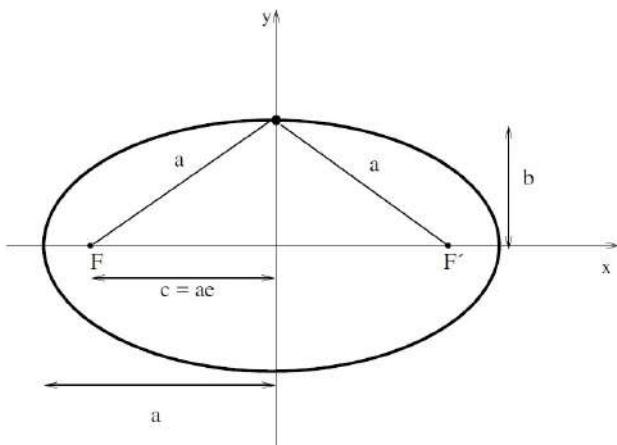


Figura 22: Modelo de uma elipse. [1]

4 Órbitas

Antes de abordar os dois eventos orbitais, é crucial questionar por que experimentamos variações na distância entre a Terra e o Sol. Essa situação é impossível em órbitas circulares, onde a distância permanece constante em relação ao centro. Apesar de a órbita circular ter sido inicialmente considerada a mais plausível, talvez devido ao seu formato mais simples, ela não correspondeu à observação. O matemático alemão Johannes Kepler (1571-1630) descobriu, após inúmeras tentativas de ajustar as órbitas dos planetas a um círculo, que uma elipse explicava muito bem o comportamento real das órbitas.

A elipse é definida como uma figura geométrica que surge ao deslocar o centro de um círculo para uma posição chamada de foco F, que possui um ponto espelhado, denotado por F'. Em consequência desse deslocamento, a elipse possui um semi-eixo maior, que denominamos de "a", e um semi-eixo menor, chamado de "b" na Figura 22. Enquanto um ponto qualquer p se desloca ao redor da elipse, ele deve obedecer à condição de que a soma das distâncias de p até o foco F e de p até o foco espelhado F' deve ser constante, sendo igual a duas vezes o semi-eixo maior (a). [1]

Definimos a excentricidade (e) de uma elipse como a razão da distância do centro ao foco sobre o semi-eixo maior. Quanto mais afastado o foco estiver do centro, maior será a excentricidade. No caso em que o foco é o próprio centro, teremos um círculo perfeito com excentricidade igual a zero.

O caminho percorrido ao longo da elipse demonstra que a distância até o foco não é cons-

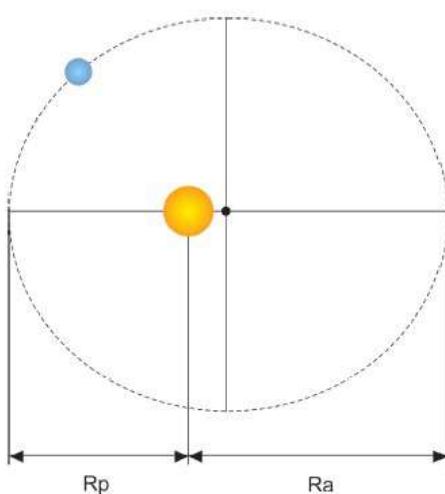


Figura 23: Os pontos de afélio (Ra) e periélio (Rp) representam as extremidades da órbita elíptica do planeta ao redor do Sol. [1]

tante, variando durante o percurso. Ao colocarmos o Sol no foco e nosso planeta orbitando ao longo da elipse, observamos dois extremos: o afélio, que é o ponto mais distante do foco, e o periélio, que é o ponto mais próximo. [1]. Temos um exemplo muito claro disso na Figura 23.

Considerando um corpo orbitando o Sol, temos as três leis de Kepler:

1- Lei das órbitas elípticas (1609): A órbita ao redor do Sol tem formato elíptico, com o Sol em um dos focos. Devido a isso, a distância do planeta ao Sol varia ao longo da trajetória.

2- Lei das áreas (1609): A velocidade ao redor do Sol é variável, mas proporcional à área que uma reta, ligando o Sol ao planeta, varre em um intervalo de tempo. Essa área é constante ao longo do tempo, mas, como a distância do planeta ao Sol varia, a velocidade também deve variar. Em outras palavras, essa linha varre áreas iguais em tempos iguais.

3- Lei Harmônica (1618): Relaciona o quadrado do período orbital dos planetas com o cubo da distância média deles ao Sol, por meio de uma constante. [1]

A órbita que descreve a trajetória da terra em torno do sol é uma elipse de excentricidade bem baixa. Embora seja pequena e quase impossível distinguir de um círculo, a comparação da distância da Terra ao Sol nos pontos extremos do afélio e periélio resulta em uma diferença de até 5 milhões de quilômetros, o que é suficiente para dar origem aos fenômenos discutidos no próximo



Figura 24: Equipamento utilizado na captura das fotos do Sol e Lua.

tópico. No evento abordado, nosso planeta está no afélio em sua órbita ao redor do Sol, enquanto a Lua se encontra no perigeu em torno da Terra. Ambos os eventos estão totalmente ligados às órbitas, com percepção visível para um observador na Terra.

5 Lua no perigeu e Terra no afélio ou “Lua mais próxima” e “Sol mais distante”

Na primeira semana de julho de 2023, ocorreram dois eventos interessantes relacionados aos posicionamentos orbitais da Lua e do Sol, separados por apenas 2 dias. Esses posicionamentos resultaram na Lua assumindo a posição de maior corpo visível no céu da Terra, que chamaremos de Gigante Cósmico do nosso ponto de vista aqui na Terra:

O Perigeu da Lua (evento mensal) ou ponto de sua órbita elíptica mais próximo da Terra, ocorreu em 04/07/2023, por volta das 19:24 (22:24 UT).

O Afélio da Terra (evento anual) ocorreu em 06/07/2023, às 17:06 (20:06 UT), quando a Terra atingiu seu ponto de órbita elíptica mais afastado do Sol.

Para aprofundar o entendimento das diferenças de tamanho da Lua e do Sol quando observados da Terra nesses dois pontos orbitais distintos, apresentaremos imagens dos astros protagonistas capturadas em momentos próximos aos referidos pontos. Utilizamos a mesma configuração de *setup* (visto na Figura 24), incluindo um telescópio Refrator APO Orion Eon de 80 mm, uma câmera Orion StarShoot Solar System Color Imaging IV e uma montagem Alt-Azimutal Vixen Porta. Todas as fotos foram tiradas com um único frame.



Figura 25: A Lua estava minguante em 04/07/2023, às 21:33 (05/07/2023, 00:33 UT), 129 minutos após o momento exato do Perigeu.



Figura 26: O Sol em 06/07/2023, às 15:57 (18:57 UT), apenas 69 minutos antes do Afélio da Terra.

A Figura 25 mostra a foto da Lua (minguante, logo após a fase cheia) obtida em 04/07/2023, às 21:33 (05/07/2023 00:33 UT), cerca de 129 minutos após o momento exato do Perigeu. Nesse instante, a distância da Terra era de 356.528 km e o diâmetro angular aparente da Lua era de 33' 30''. A lunação estava em 16,83 dias, e sua iluminação era de 96,5 por cento.

A Figura 26 mostra a foto do Sol (Fotosfera) capturada em 06/07/2023, às 15:57 (18:57 UT), quando a distância da Terra era de 152.091.000 km e o diâmetro angular aparente estava em 31' 27". Essa imagem foi registrada apenas 69 minutos antes do Afélio da Terra, momento em que a Terra estaria mais distante do Sol.



Figura 27: Os semi-hemisférios lunar e solar, lado a lado, para comparação de seus tamanhos aparentes em relação aos parâmetros orbitais especiais.



Figura 28: As imagens da Lua e do Sol estão lado a lado, mostrando a diferença angular dos diâmetros causada pela proximidade do Perigeu da Lua e do Afélio da Terra.

Para comparar a diferença de diâmetros aparentes entre a Lua (fotografada 129 minutos após o momento de seu Perigeu, portanto, mais próxima da Terra) e o Sol (fotografado 69 minutos antes do instante do Afélio da Terra, logo, mais distante de nosso planeta), apresentamos uma composição fotográfica na Figura 27 com sobreposição de imagens de semi-hemisférios. Note que, no momento da captura da foto da Lua, ela

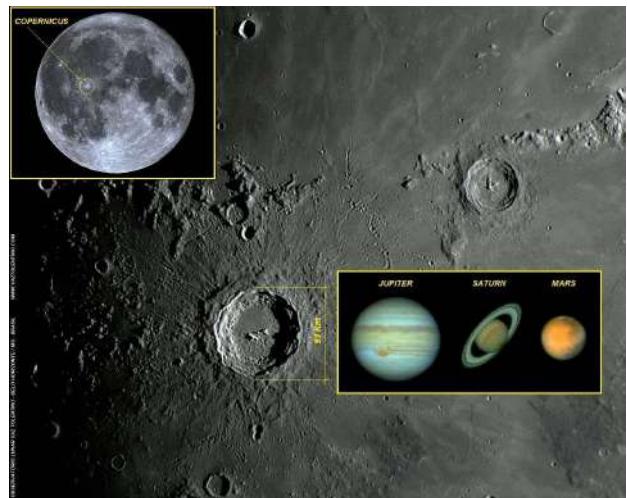


Figura 29: “Lua, gigante cósmico!” Comparaçao do tamanho aparente dos planetas com a cratera *Copernicus*.

estava a uma distância de 356.528 km da Terra, e seu diâmetro angular aparente era de 33' 30". Já o Sol, no momento da captura de sua imagem, estava a uma distância de 152.091.000 km da Terra, com um diâmetro angular aparente de 31' 27".

Uma outra forma interessante de visualizar essa condição de diferença entre os diâmetros angulares aparentes da Lua e do Sol, causada por parâmetros orbitais distintos, seria colocar as imagens dos dois referidos astros lado a lado na Figura 28.

Apresentando mais um motivo que torna a Lua um enorme alvo astronômico em comparação a outros corpos celestes, como os planetas, vemos na composição fotográfica da Figura 29 mais um ponto que reforça essa afirmação. A composição de imagens mostra a comparação dos tamanhos de Júpiter, Saturno, Marte e da cratera lunar *Copernicus*, todos fotografados pelo mesmo conjunto de telescópio/câmera. É importante notar que Júpiter, o maior planeta do Sistema Solar, quando observado da Terra, tem aproximadamente o mesmo diâmetro angular da cratera *Copernicus*, que possui 93 km de diâmetro. Isso demonstra o colossal alvo que é nosso satélite natural, configurando-se como um extenso território extraterrestre a ser observado, estudado e explorado, não só por naves espaciais robóticas ou tripuladas, mas também por telescópios baseados na Terra.

Com base nessas comparações, percebemos que, sob nossa perspectiva da Terra, a Lua se revela verdadeiramente como um Gigante Cósmico!

Sobre os autores

Luiz Ravell A. A. Dias (luizantonio@aluno.ufop.edu.br) é discente do curso Bacharel em Física dos materiais pela Universidade Federal de Ouro Preto, onde é integrante do Projeto de Extensão “Divulgando Astronomia de Ouro Preto ao litoral do Espírito Santo” sob a orientação do Professor Dr. Hermano Velten, docente do Departamento de Física da UFOP e do programa de pós-graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação PPGCosmo/Ufes.

Ricardo José Vaz Tolentino (vaztolentino@gmail.com) é Mestre em Tecnologia com ênfase em Manufatura Integrada por Computador pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, possui Pós-Graduação em Análise de Sistemas de Informação e Metodologia do Ensino Superior pela União de Negócios Administrativos (UNA) e Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy. Foi Diretor da Faculdade de Ciências Empresariais da Universidade Fundação Mineira de Educação e Cultura (FUMEC), onde atuou também como docente em disciplinas dos cursos de graduação e

pós-graduação Lato Sensu.

Referências

- [1] K. de Souza Oliveira Filho e M. de Fátima Oliveira Saraiva, *Astronomia e astrofísica* (Editora da Física, São Paulo, 2014).
- [2] M. Barboni et al., *Early formation of the Moon 4.51 billion years ago*, *Science Advances* **3**(1) (2017).
- [3] G. Afonso, *O céu dos índios do Brasil*, in *Anais da 66^a Reunião Anual da SBPC* (2014). Disponível em https://www.sbpcnet.org.br/livro/66ra/PDFs/arq_1506_1176.pdf, acesso em fev. 2024.
- [4] S. Ryan e A. Norton, *Stellar Evolution and Nucleosynthesis* (Cambridge University Press, 2010).
- [5] E. Echer et al., *O número de manchas solares, índice da atividade do sol*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**(2), 157 (2003).

Machine learning: investigando a relação entre atmosferas biogênicas, exoplanetas e sistemas planetários

Luander Bernardes^{1,2,3} e Anna Carolina Martins^{1,4}

¹Universidade de São Paulo

²Centro Universitário Estácio de Ribeirão Preto

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

⁴Universidade Estadual de Campinas

Resumo

A proposta da pesquisa foi estudar alguns sistemas planetários em busca de exoplanetas capazes de sustentar atmosferas biogênicas e entender o papel deles nesse contexto. Para essa tarefa, foi considerado o *Earth similarity index* (ESI), que é um índice de classificação de exoplanetas por similaridade com a Terra, porém, considerando uma perspectiva de modelagem multinível. A caracterização destes sistemas é importante, pois missões astronômicas, cujo objetivo seja identificar marcadores biológicos que denunciem a presença de vida, podem escolher alvos prioritários e eliminar alvos menos promissores. Foram estudados 72 sistemas extrassolares por meio de técnicas não supervisionadas e supervisionadas de *machine learning* com o objetivo de identificar a formação de *clusters* e investigar a relação multinível entre planetas e sistemas extrassolares. O trabalho demonstra que, provavelmente, uma ampla variedade de tipos de exoplanetas pode abrigar atmosferas aptas a serem estudadas remotamente, apesar de que esses resultados não consideram as constituições internas reais dos objetos estudados, já que elas são desconhecidas, o que impede uma reconstrução histórica do processo de evolução desses planetas. A abordagem multinível demonstra que aproximadamente 54% da variação do valor do ESI se deve ao efeito das condições do sistema planetário onde está localizado o exoplaneta em estudo.

Abstract

The research proposal was to study planetary systems with exoplanets capable of sustaining biogenic atmospheres and understand their role in this context. For this task, the Earth similarity index (ESI) coupled to a multilevel modeling perspective was considered, as it is an index for classifying exoplanets by similarity to Earth. The characterization of these systems is important because astronomical missions whose objective is to identify biological markers that reveal the presence of life will be able to choose priority targets and eliminate less promising targets. 72 extrasolar systems were studied using unsupervised and supervised Machine Learning techniques with the aim of identifying the formation of clusters and investigating the multilevel relationship between planets and planetary systems. The work demonstrates that a wide variety of types of exoplanets can probably harbor atmospheres capable of being studied remotely, although these results do not consider the real internal constitutions of the objects studied, as they are unknown, preventing a historical reconstruction of the evolution process of these planets. The multilevel approach demonstrates that approximately 54% of the variation in the ESI value is due to the effect of the conditions of the planetary system where the exoplanet under study is located.

Palavras-chave: exoplanetas, atmosferas biogênicas, aprendizado de máquina.

Keywords: exoplanets, biogenic atmospheres, machine learning

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43184](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43184)

1 Introdução

Desde a descoberta do primeiro exoplaneta a orbitar uma estrela da Sequência Principal [1], um enorme esforço vem sendo realizado pela comunidade científica para tentar entender algumas

questões básicas, relacionadas à existência destes novos mundos como, por exemplo, como são constituídos?; qual a constituição de suas atmosferas?; apresentam condições mínimas para serem habitáveis? etc. Metodologias, modelos e mis-

sões espaciais vêm sendo propostas e executadas há décadas, com a finalidade de compreender as características desta vasta população de planetas extrassolares descobertos até o momento.

Muitos destes esforços permitiram uma razoável compreensão e popularização de conceitos importantes como o de Zona Habitável de um sistema planetário [2]. Hoje, sabe-se que essa é a região em torno da estrela de um sistema extrassolar, onde há grandes possibilidades da existência de água no estado líquido. Essa informação é relevante, pois é sabido que a vida na Terra utilizou esse solvente para se desenvolver e evoluir. Tal constatação sempre foi utilizada para que planetas localizados nessa região fossem alvos prioritários para missões em busca de bioassinaturas, que pudessem indicar a presença de vida fora da Terra. Porém, planetas podem estar localizados no interior de Zonas Habitáveis e não possuírem condições para abrigar vida ou até mesmo reter uma atmosfera que possa ser analisada remotamente, que é a única maneira de se obter informações sobre a história biológica destes corpos.

Apesar de vários planetas extrassolares terem sido descobertos e estudados, pouco se conhece a respeito de sua constituição interna, o que impede uma análise mais rigorosa sobre as reais condições de sua superfície e de sua atmosfera. Heller e Armstrong [3] afirmam que um planeta mais massivo do que a Terra deve possuir uma superfície maior, propiciando uma quantidade de biomassa e biodiversidade mais elevada. Esse fato favorece a manutenção de uma atmosfera densa (e, provavelmente, contaminada com marcadores biológicos), já que a gravidade do exoplaneta é maior. Porém, pesquisas recentes indicam que planetas com duas massas terrestres são em sua maioria mininetunos, provavelmente com atmosferas ricas em gases leves como o hidrogênio, o que não favorece cenários similares aos encontrados na Terra [4].

Outros estudos apontam que planetas mais massivos poderiam ter o regime de movimentação de placas tectônicas comprometido e, consequentemente, ter o ciclo silicato-carbono não ativo [5,6] ou até mesmo evoluírem para planetas do tipo Vênus, com maiores atividades vulcânicas e emissão de gases [7,8].

Como vários aspectos desses novos mundos ainda não são conhecidos e muitos nem serão ci-

tados aqui, esta pesquisa analisou planetas com raios entre 0,3 – 2,5 raios terrestres e massas variando entre 0,01 – 10 massas terrestres, o que abrange planetas semelhantes a Marte (0,4 – 0,8 raios terrestres), à Terra (0,8 – 1,6 raios terrestres), a superterrás (1,6 – 2,5 raios terrestres) e a Mininetunos (1,6 – 2,5 raios terrestres), orbitando estrelas do tipo espectral M (2400 – 3700 K), K (3700 – 5200 K) e G (5200 – 6000 K). Essa escolha foi realizada, pois há grandes chances de vários exoplanetas, contidos nessa faixa de análise, abrigarem atmosferas detectáveis. Ressalte-se, ainda, que as características dos exoplanetas (massa, raio etc.) e de seus sistemas (tipo espectral da estrela, luminosidade etc.) foram analisados com base em dados públicos disponibilizados pela National Aeronautics and Space Administration [9]. Foram estudados 72 sistemas planetários com o objetivo de se utilizar modelagens e técnicas de *machine learning* para identificar os exoplanetas mais aptos a possuírem atmosferas biogênicas. Na tentativa de analisar as relações entre sistemas planetários e seus planetas em uma perspectiva de clusterização e de análise multinível, foi utilizado o *Earth similarity index* (ESI), um índice de classificação de exoplanetas por similaridade com a Terra que varia entre 0 e 1 (quanto mais próximo de um mais semelhante à Terra). Vale lembrar que o índice não denota que o planeta seja realmente habitável [10].

Analizando o ESI quando aplicado no estudo de corpos celestes presentes no Sistema Solar, percebe-se que seus valores podem ser úteis para um estudo comparativo da similaridade deles com os exoplanetas descobertos. Marte, por exemplo, possui um valor de ESI global de 0,70, já Vênus um valor de 0,44, enquanto Júpiter 0,29, Saturno 0,25 e Netuno 0,18. Se forem consideradas as luas, alvos de estudos astrobiológicos, encontram-se Europa com ESI igual a 0,26, Titã com valor igual a 0,24, Enceladus com 0,094 e Io com 0,36 [10].

Com as características dos sistemas planetários, dos exoplanetas e o ESI, é possível realizar processos de clusterização e análises multiníveis com o objetivo de entender a correlação entre características dos planetas e de seus sistemas na configuração de potenciais alvos na busca de sinais biológicos, utilizando a Terra como modelo, mas considerando situações mais abran-

Tabela 1: Variáveis selecionadas. O período orbital, P_p , é dado em dias e a luminosidade estelar, L_s , é dada em termos do logaritmo da luminosidade solar. Fonte: dados originais de pesquisa oriundos do banco de dados da NASA [9].

Nome do Planeta	Planeta	Sistema	ESI	R_p	M_p	P_p	L_s
GJ 357 b	1	1	0,36	1,20	1,84	3,93	-1,80
GJ 357 c	2	1	0,43	1,66	3,40	9,12	-1,80
GJ 357 d	3	1	0,45	2,34 6,10	55,66	-1,80	
GJ 9827 b	4	2	0,22	1,58	5,14	1,21	-0,94
GJ 9827 c	5	2	0,27	1,24	1,24	3,65	-0,94
:	:	:	:	:	:	:	:
YZ Cet d	240	72	0,66	1,03	1,09	4,66	-2,66

gentes como, por exemplo, a análise de planetas extrassolares fora da zona habitável. Assim, entende-se que planetas mais semelhantes à Terra possuem uma probabilidade maior de abrigar uma atmosfera que agregue importantes informações sobre a sua evolução.

2 Materiais e métodos

Os dados utilizados na pesquisa se referem a algumas características de 240 exoplanetas, aninhados em 72 sistemas planetários e que podem ser observadas, em parte, na Tabela 1. Nela, são apresentados o nome do exoplaneta e a sua identificação de nível (1), assim como a identificação de nível (2) para os sistemas planetários. Ainda foram dispostos o valor do ESI, do raio do planeta, R_p (em raios terrestres), da massa do exoplaneta, M_p (em massas terrestres), do período orbital do planeta, P_p (dado em dias) e da luminosidade estelar, L_s (log da luminosidade solar), que é uma característica associada à estrela de cada sistema planetário.

Uma avaliação preliminar dos dados contidos na Tabela 1 aponta para a possibilidade da utilização da modelagem multinível nesta pesquisa. A estrutura básica dessa abordagem considera que os exoplanetas estão aninhados nos sistemas planetários, o que leva à criação de um modelo com dois níveis. A estruturação dos dados em níveis é vantajosa quando comparada às aquelas que se utilizam de modelos clássicos de regressão linear, pois permite discutir determinadas correlações a partir de uma perspectiva hierárquica, considerando dependências entre observações pertencentes a um mesmo grupo, o que torna possível a

captura de comportamentos de variáveis estudadas em cada um dos níveis propostos [11]. A hierarquia proposta aqui considera os exoplanetas constituindo o nível 1 e os sistemas planetários o nível 2 (vide Figura 1). Os dados referentes às características dos 240 exoplanetas abordados nesta pesquisa foram agrupados por semelhança utilizando o método não hierárquico k-means, que consiste no agrupamento de elementos amostrais em determinado *cluster* cujo centróide (vetor de média amostral) é o mais próximo do vetor de valores observados para o respectivo elemento [13]. O objetivo da utilização da técnica está relacionado à investigação das características dos planetas, que constituem as aglomerações e que podem estar associadas ao ESI. Como a técnica exige que se escolha previamente a quantidade de *clusters*, foram utilizados o método hierárquico aglomerativo e o método de *elbow* para definir esse valor [11].

Segundo Fávero e Belfiore [11], o método hierárquico Aglomerativo pode ser utilizado em casos em que todas as observações são consideradas separadamente e, a partir de suas distâncias ou semelhanças, sejam formados grupos até que se estabeleça um estágio final com apenas um agrupamento. Dentre os métodos existentes (*single linkage*, *complete linkage* e *average linkage*), optou-se pelo denominado encadeamento completo (*complete linkage*), que dá preferência às maiores distâncias entre as observações ou grupos na formação de novos agrupamentos. Ele é utilizado em situações em que não há afastamentos consideráveis entre as observações e que o objetivo final da investigação seja a identificação das heterogeneidades existentes entre elas. John-

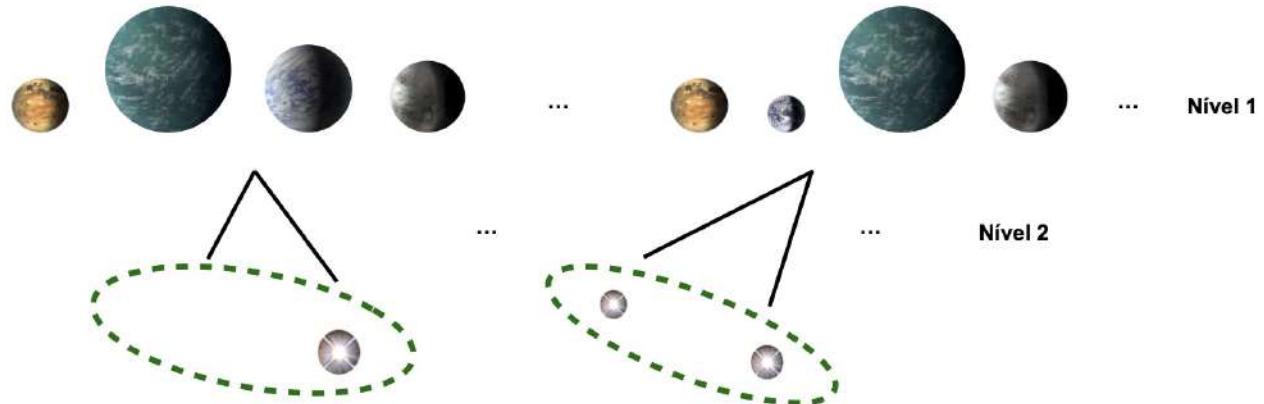


Figura 1: Esquema da Modelagem Multinível. Nível 1: exoplanetas; nível 2: sistemas planetários. Fonte: resultados originais de pesquisa [12].

son e Wichern [14] apresentam uma sequência de procedimentos que facilita a compreensão do método hierárquico aglomerativo, cujo resultado é um gráfico de árvore, denominado dendrograma, que explicita o processo de aglomeração, apontando a alocação de cada observação em cada agrupamento. A aplicação do método nos dados desta pesquisa gerou um dendrograma, sugerindo a existência de quatro *clusters*.

Outra técnica utilizada para a escolha da quantidade de *clusters* a ser inserida como *input* no algoritmo *k-means* foi o método do cotovelo (*elbow method*). Ela é responsável por simular diversas divisões em número crescente de grupos e calcular as variâncias internas de cada um deles, almejando um ponto de equilíbrio [15]. Ao final do processo é gerado um gráfico a partir do qual é possível extrair a quantidade ideal de *clusters* a ser considerada. Para o conjunto de dados deste estudo, o método apontou quatro *clusters*, confirmado a estimativa oriunda do método *complete linkage*.

3 Clusterização

O estudo dos agrupamentos de exoplanetas pode ser realizado de forma mais consistente com a utilização da técnica de análise das componentes principais ou PCA (*principal component analysis*). A PCA é uma técnica matemática que é capaz de construir novas métricas ou variáveis, que passam a ser uma combinação linear das métricas originais. Segundo Dangeti (2017), ela pode ser utilizada como mecanismo de redução de

dimensionalidade de um determinado conjunto de dados, sendo amplamente utilizada em etapas de pré-processamento, que visam o uso de métodos de clusterização como, por exemplo, o método *k-means*, permitindo uma melhor visualização dos dados em um espaço de duas dimensões, assim como a melhora da generalização dos algoritmos.

Com a finalidade de agrupar variáveis que apresentam correlações significativas entre si, foi realizada uma redução da dimensionalidade da base de dados, que no caso desse estudo apresenta quatro variáveis fundamentais: o raio e a massa do planeta, o ESI e a luminosidade estelar. A redução da dimensionalidade foi realizada por meio da técnica de análise de componentes principais (PCA), isto é, passou-se de quatro para duas dimensões (componente 1 e componente 2). A primeira componente representa 59,2% das informações contidas nas variáveis originais, enquanto a segunda, 29,7%, totalizando aproximadamente 88,8%. Assim, é possível trabalhar com duas dimensões, PC1 e PC2 (espaço bidimensional), que carregam consigo grande parte das informações contidas nas variáveis originais. Vale lembrar, que os fatores resultantes desta técnica são ortogonais entre si e, consequentemente, possuem correlação igual a zero e podem ser utilizados em situações que demandem ausência de colinearidade [11]. Dessa forma, os exoplanetas foram agrupados em quatro *clusters*, o que facilitou a compreensão das relações existentes entre eles.

A análise de PCA foi utilizada já que foram observadas correlações entre as variáveis de estudo. Como já esperado, há uma correlação positiva (0,84) entre a massa e o raio do exoplaneta,

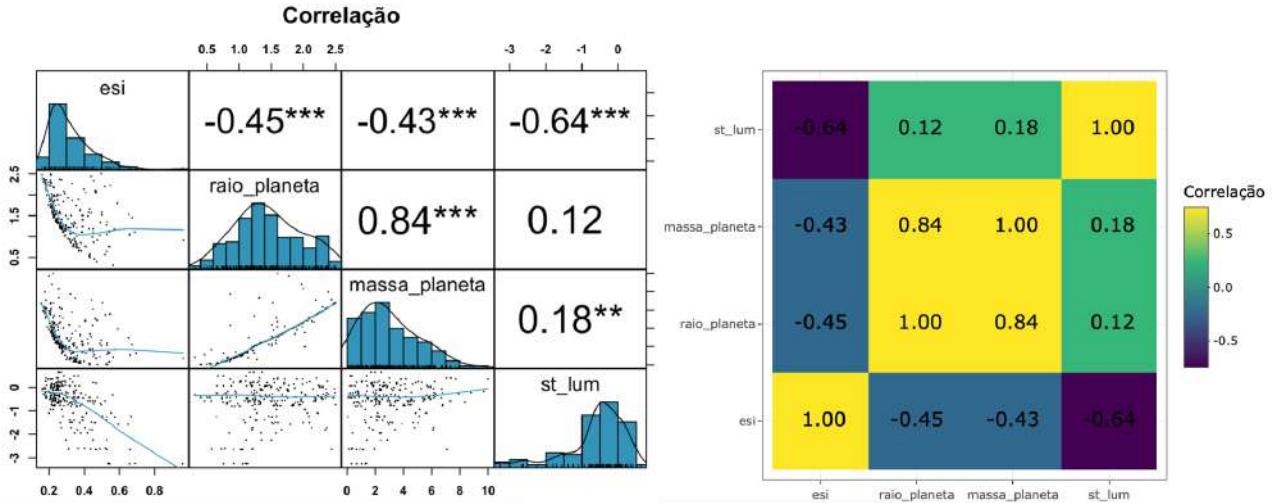


Figura 2: Correlações entre as variáveis de estudo e a relação entre ESI e luminosidade estelar; ESI é o índice de similaridade com a Terra, st_lum é a luminosidade estelar, raio_planeta é o raio do planeta e massa_planeta é a massa do planeta. Fonte: dados originais de pesquisa [12].

Tabela 2: Teste de esfericidade de Bartlett. Fonte: resultados originais de pesquisa [12]

	X ²	P-valor	Graus de liberdade
Esfericidade de Bartlett	496,76	0,00	6

Tabela 3: Autovalores e variância compartilhada. Fonte: resultados originais de pesquisa [12]

	PC1	PC2	PC3	PC4
Autovalor	2,36	1,18	0,30	0,14
Variância Compartilhada	59,20 %	29,70 %	7,50 %	3,60 %
Variância Cumulativa	59,20 %	88,80 %	96,40 %	100,00 %

confirmado que planetas mais massivos possuem raios maiores. Ficou evidenciado que a luminosidade estelar, característica da estrela do sistema planetário que pode ser entendida como a energia emitida por ela por unidade de tempo, possui uma correlação negativa (-0,64) com o ESI, mostrando a importância dessa variável de contexto na busca por planetas que possam abrigar atmosferas detectáveis. A Figura 2 mostra as correlações entre as variáveis de estudo.

A garantia de que os dados se adequavam à análise proposta ocorreu por meio do teste de esfericidade de Bartlett (vide Tabela 2), onde fica evidenciado que para um nível de significância de 5%, pode-se rejeitar a hipótese nula de que a matriz de correlações de Pearson para as variáveis de estudo seja igual a uma matriz identidade de mesma ordem, ou seja, de que todas as correla-

ções entre as variáveis apresentadas na Figura 2 sejam estatisticamente iguais a zero [11].

A análise dos fatores obtidos e a variância compartilhada capturada por cada um deles é mostrada na Tabela 3.

A escolha das duas primeiras componentes e a consequente redução de dimensionalidade ficam justificadas pelo critério de Kaiser, que considera a tomada de fatores com autovalor superior a um.

Segundo Fávero e Belfiore [11], o método de aglomeração não hierárquico *k-means* pode ser utilizado para dividir as observações contidas em um banco de dados em *k clusters*, garantindo que estejam mais próximas entre si quando comparada a qualquer outra pertencente a um diferente, ou seja, espera-se que a variabilidade entre os agrupamentos formados seja grande, mas que a variabilidade dentro deles seja pequena. O proce-

dimento requer que a quantidade de *clusters* seja definida a priori e, nesta pesquisa, optou-se por utilizar o método hierárquico aglomerativo (distância euclidiana / método *complete linkage*), que indicou a formação de quatro *clusters*, em conjunto com uso do método *elbow* (ou método cotovelo), que também sugeriu a formação de quatro *clusters*.

As variáveis escolhidas para clusterização foram: os índices ESI, os raios e as massas dos exoplanetas, além das luminosidades estelares. A escolha é uma forma de garantir que a clusterização terá como base ao menos duas características associadas à classificação dos exoplanetas (tipo Marte, Terra, superterrás ou mininetunos) e ao menos uma correlacionada ao sistema planetário (luminosidade estelar), além do índice de similaridade com a Terra.

Ressalta-se que o objetivo da clusterização foi verificar como a distribuição dos exoplanetas pode gerar agrupamentos, que contenham informações relevantes sobre a similaridade deles com a Terra. A ideia é de que ESIs altos estejam associados a planetas mais propensos a abrigar atmosferas biogênicas. Foi estipulado um valor de corte em que exoplanetas com valores de ESI igual ou maior a 0,5 seriam aqueles com as maiores probabilidades de possuírem um conteúdo atmosférico. Como não há muitas informações reais sobre os envoltórios gasosos dos planetas extrassolares, o valor adotado pode ser utilizado para execução de algumas investigações, mas podendo ser revisto posteriormente.

A Figura 3 mostra os *clusters* formados a partir da utilização do método *k-means* e das componentes um e dois oriundas da redução de dimensionalidade proporcionada pela utilização da PCA. Vale ressaltar que os círculos azuis representam os centróides dos *clusters*, ou seja, pontos a partir dos quais as observações semelhantes se agruparam.

Outras correlações que se apresentam passíveis de investigação são aquelas entre o raio do exoplaneta e o ESI e entre o período orbital e o ESI, já que se pretende estudar os mais diversos cenários. A Figura 4 mostra a distribuição dos valores do índice ESI em função dos raios, dos períodos orbitais e das massas dos exoplanetas, onde fica evidenciado que valores de similaridade acima de 0,50 estão distribuídos em uma ampla faixa de va-

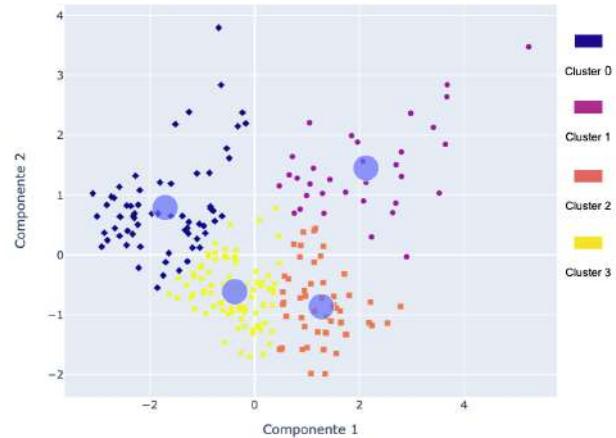


Figura 3: Distribuição dos planetas por *cluster*. Os círculos azuis representam os centros de aglomeração. Fonte: resultados originais de pesquisa [12].

lores de raios e massas. Quando se observa a relação entre os períodos orbitais e o ESI, percebe-se que valores acima 0,5 possuem, também, a tendência de se distribuírem por uma faixa diversificada de valores, porém temos um viés que está correlacionado com a quantidade de dados disponíveis para análise (poucos planetas com períodos orbitais maiores detectados). Desse modo, não é prudente a desconsideração de nenhum tipo de exoplaneta quando se pensa na busca por atmosferas biogênicas extraterrestres.

A análise da Figura 4 e dos dados contidos na Tabela 4, referentes aos *clusters* formados e apresentados na Figura 3, mostram que o conjunto de exoplanetas que apresenta os maiores valores para a variável ESI, possui raios variando entre 0,57 e 1,80 raios terrestres e massas, com valores entre 0,07 e 3,89 massas terrestres, constituindo o *cluster* número 1. Também é perceptível que os *clusters* 0 e 2 possuem uma população de planetas com valores para o ESI médio inferiores quando comparado à média do *cluster* 1, porém abriga exoplanetas com valores para o ESI acima de 0,50. Já o *cluster* 3, possui objetos com baixos valores para o ESI, sendo que o maior valor é igual 0,42. Entretanto, percebe-se que todos os *clusters* formados comportam planetas semelhantes a Marte, Terra, superterrás e mininetunos, o que aponta para uma considerável diversidade de exoplanetas com propensão para abrigar atmosferas e passíveis de serem estudadas remotamente.

É possível apontar os exoplanetas que possuem a maior probabilidade de abrigar envoltórios ga-

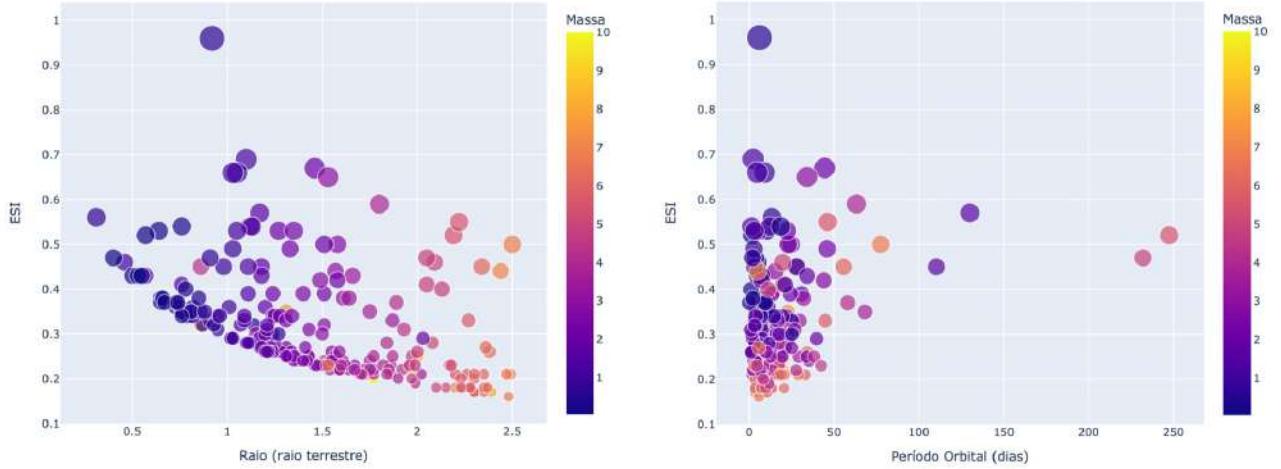


Figura 4: Relação entre ESI e raio e entre ESI e período orbital de exoplanetas. A massa na escala de cores é apresentada em unidades terrestres. Fonte: dados originais de pesquisa [12].

Tabela 4: Características dos *clusters* formados pelo algoritmo *k-means*. Fonte: resultados originais de pesquisa [12]

Dados estatísticos	cluster 0				cluster 1			
	ESI	Rp	Mp	Ls	ESI	Rp	Mp	Ls
Média	0,25	2,09	5,69	- 0,50	0,50	1,21	1,72	- 2,16
Desvio Padrão	0,09	0,27	1,34	0,58	0,13	0,32	1,04	0,72
Valor mínimo	0,16	1,31	3,53	- 2,64	0,30	0,57	0,07	- 3,26
25 %	0,19	1,96	4,66	- 0,73	0,39	1,03	0,94	- 2,66
50 %	0,22	2,15	5,60	- 0,46	0,50	1,19	1,76	- 2,10
75 %	0,26	2,30	6,21	- 0,06	0,54	1,51	2,41	- 1,50
Valor máximo	0,55	2,50	10,00	0,41	0,96	1,80	3,89	- 1,23
Nº de planetas	65				34			

Dados estatísticos	cluster 2				cluster 3			
	ESI	Rp	Mp	Ls	ESI	Rp	Mp	Ls
Média	0,36	0,90	0,99	- 0,44	0,26	1,44	2,82	- 0,17
Desvio Padrão	0,06	0,25	0,76	0,46	0,04	0,22	0,94	0,40
Valor mínimo	0,27	0,31	0,04	- 1,71	0,20	0,86	1,37	- 1,50
25 %	0,33	0,76	0,44	- 0,63	0,23	1,24	2,18	- 0,50
50 %	0,35	0,89	0,80	- 0,43	0,25	1,43	2,63	- 0,12
75 %	0,39	1,12	1,40	- 0,24	0,27	1,60	3,33	0,09
Valor máximo	0,56	1,33	4,30	0,50	0,42	2,03	7,70	0,63
Nº de planetas	56				85			

sosos, capazes de conter materiais biológicos passíveis de serem observados, considerando o índice de similaridade com a Terra. A Tabela 5 apresenta aqueles planetas que possuem valores para o ESI maiores ou iguais a 0,5 e seus respectivos *clusters*.

Os resultados oriundos da aplicação das técnicas de *machine learning*, demonstram que há uma variedade grande de exoplanetas que podem servir de alvos na busca por bioassinaturas. É evidente que alguns se mostram mais propensos a possuir uma atmosfera biogênica, pois pos-

Tabela 5: Exoplanetas com maior propensão para abrigar atmosferas biogênicas. Fonte: resultados originais de pesquisa [12]

Planeta	ESI	Sistema Planetário	cluster
K2-3c	0,50	6	3
K2-3d	0,67	6	1
Kepler 138-b	0,53	15	1
Kepler 138-d	0,50	15	3
Kepler 174-d	0,52	22	0
Kepler 186-e	0,53	24	1
Kepler 186-f	0,57	24	1
Kepler 235-e	0,55	33	0
Kepler 296-e	0,65	41	1
Kepler 296-f	0,59	41	1
Kepler 298-d	0,50	42	1
Kepler 37-b	0,56	54	2
Kepler 42-d	0,52	58	1
Kepler 446-d	0,53	62	1
Trappist-1b	0,54	71	1
Trappist-1c	0,69	71	1
Trappist-1e	0,96	71	1
Trappist-1f	0,66	71	1
Trappist-1g	0,54	71	1
Trappist-1h	0,54	71	1
YZ Cet c	0,53	72	1
YZ Cet d	0,66	72	1

suem um grau de similaridade com a Terra maior. Percebe-se, também, que dos 72 sistemas extrasolares estudados, apenas 12 possuem exoplanetas com ESI maior ou igual a 0,5.

Ressalta-se que a pesquisa tem como proposta entender o motivo pelo qual a similaridade com a Terra é mais elevada para certos grupos de planetas. Será que ela se deve somente às condições intrínsecas dos exoplanetas ou está fortemente correlacionada às características do sistema planetário onde eles estão localizados? Dessa forma, o objetivo do trabalho não é apenas apresentar uma equação que forneça uma estimativa do grau de similaridade de exoplanetas com a Terra e, consequentemente, expor aqueles mais aptos a apresentarem um envelope gasoso, mas também, de tentar fornecer a porcentagem de contribuição dos fatores ligados às características dos planetas e das particularidades dos sistemas planetários na constituição desse índice de similaridade, com o intuito de quantificar essa informação.

4 Modelagem multinível HLM2 nulo (modelos hierárquicos lineares de dois níveis)

A tentativa de entender como a variável ESI pode estar correlacionada com parâmetros dos exoplanetas e dos sistemas planetários onde estão localizados passa, necessariamente, pela aplicação de uma modelagem multinível. Assim, considerou-se que os exoplanetas (nível 1) estão aninhados a sistemas planetários (nível 2), conforme mostra a Figura 1. Os modelos multiníveis incorporam naturalmente a estrutura de agrupamento dos objetos a serem estudados e podem ser bem complexos. Neste trabalho, apesar do estudo da decomposição da variância nos diferentes níveis de análise do fenômeno físico de interesse, não foram incluídas variáveis explicativas. Segundo Fávero e Belfiore [11], essa inclusão agregaria investigações adicionais das relações entre essas variáveis e a variável dependente, já que seriam consideradas interações atreladas aos distintos níveis nos componentes de efeitos fixos e aleatórios, o que tornaria o modelo mais sofisticado e apto a investigar outros cenários.

O propósito não é somente verificar se há variabilidade no valor do ESI, quando se considera planetas que estão localizados em sistemas planetários distintos, mas sim quantificar esse efeito. Segundo Fávero e Belfiore [11], a verificação pode ser iniciada com a utilização de um modelo multinível nulo (HLM2-nulo), já que nesse tipo de modelagem não há procedimentos do tipo *stepwise*. Desse modo, utilizou-se a metodologia baseada no *step-up strategy* [16], que consiste em criar modelos cada vez mais complexos, a partir da inserção de efeitos aleatórios de interceptos, de inclinação, assim como de variáveis explicativas e contextuais, comparando suas eficiências por meio, por exemplo, do ganho de *log-likelihood* (teste de rossimilhança).

Aqui, é apresentado somente o resultado da análise do comportamento de um modelo multinível simplificado HLM2 nulo, ou seja, a primeira etapa do método *step-up strategy*. O modelo proposto pode ser descrito pelas seguintes equações

$$\text{Nível 1} \longrightarrow \text{ESI}_{ij} = \beta_{0j} + \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

e

$$\text{Nível 2} \longrightarrow \beta_{0j} = \gamma_{00} + \nu_{0j}, \quad (2)$$

Tabela 6: Modelo HLM2 nulo. $var(\nu_{0j})$ e $var(e)$ são as variâncias dos termos de erro e são utilizadas para calcular a correlação intraclasses (ICC). Fonte: resultados originais de pesquisa [12]

Componentes	Variância	Desv. Pad.	P-valor	
$var(\nu_{0j})$	0,007	0,001	0,000	
$var(e)$	0,005	0,001	0,000	
Coeficientes	Estimativa	t valor	Desv. Pad	P-valor
Intercepto	0,309	27,887	0,011	0,000

ou seja,

$$ESI_{ij} = \gamma_{00} + \nu_{0j} + \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

onde γ_{00} é o valor do intercepto (representa a média global do ESI), ν_{0j} o efeito aleatório de intercepto (associado ao nível 2 se relacionando com o afastamento do ESI médio do planeta j à média global) e ε_{ij} o termo de erro (efeito aleatório associado ao nível 1 – indivíduo ij).

O modelo descrito pela equação 3 não considera variáveis explicativas e, mesmo assim, apresenta resultados interessantes, principalmente quando comparado ao modelo de mínimos quadrados ordinários (MQO) no que se refere a valores de *log-likelihood*, que apresenta um ganho substancial a partir da inclusão de um grau de liberdade a mais (214,37 contra 172,584). O resultado da análise do HLM2 nulo é apresentado na Tabela 6.

O modelo HLM2 nulo já é capaz de mostrar que existe variabilidade no valor do ESI entre exoplanetas provenientes de sistemas planetários distintos, mesmo que não tenham sido incorporadas nele variáveis explicativas ou de contexto como, por exemplo, o período orbital, a temperatura de equilíbrio, luminosidade estelar etc., ou seja, apenas considerando a existência de um intercepto γ_{00} e dos termos de erro ν_{0j} e ε_{ij} . Esse efeito ocorre, pois o fato de ν_{0j} ser diferente de zero indica que as “curvas” associadas a cada sistema planetário não possuem γ_{00} iguais.

Assim, as diferenças entre os valores do ESI para planetas que estão localizados em sistemas extrassolares distintos são justificadas, pois a variância do termo ν_{0j} é estatisticamente significante. Essa constatação pode parecer óbvia, mas o que se busca é uma quantificação do efeito que o ambiente planetário exerce na constituição do valor do ESI e, consequentemente, na probabilidade de certo planeta abrigar um conteúdo gasoso. A importância relativa do efeito sistema planetário

sobre o valor do ESI pode ser estimada calculando a correlação intraclasses (ICC), que é a razão entre o efeito sistema planetário e a soma das variâncias. Com o cálculo do ICC, $ICC = \frac{0,007}{0,007+0,006}$, que apontou um valor aproximado para este modelo simplificado de 0,54, ficou evidenciado que 54% da variação do valor do ESI é devido ao efeito sistema planetário.

A equação que descreve o modelo HLM2 nulo pode ser reescrita como

$$ESI_{ij} = 0,309 + \nu_{0j} + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

Segundo Tabachnick e Fidell [17] e observando que a variância do termo ν_{0j} se mostrou significante, percebe-se que não é prudente a utilização de um modelo de regressão linear tradicional (OLS - *ordinary least squares*) para o estudo do fenômeno de interesse, que está ligado a análises de contextos complexos como a interação planeta - sistema planetário. Ou seja, a relação entre o ESI e outras variáveis como, raio, massa, luminosidade etc., deve ser estudada considerando modelagens multiníveis.

5 Conclusão

Por meio das análises estatísticas desenvolvidas nesta pesquisa, é possível concluir, mesmo considerando certas limitações, que há uma grande variedade de exoplanetas capazes de abrigar atmosferas biogênicas. Essa conclusão é baseada no índice ESI e na noção de que quanto mais parecido com a Terra, maiores são as chances de eles possuírem um envoltório gasoso detectável. A limitação ocorre, pois há poucas informações reais sobre a constituição interna desses corpos planetários, além do fato de que foi estipulado um valor de corte para o ESI (maior ou igual a 0,5)

que está associado à presença de envelopes gassosos, podendo até mesmo ser considerado otimista ou mesmo pessimista, já que não existem muitas informações sobre as atmosferas dos exoplanetas descobertos.

A partir da análise realizada com o modelo não hierárquico *k-means*, foi possível indicar alguns exoplanetas que apresentam maiores probabilidades de possuírem uma atmosfera, contendo, porventura, algum material biológico passível de detecção remota. O modelo foi capaz de agrupar em *clusters* exoplanetas, que possuem entre si e com a Terra algum grau de semelhança, deixando evidente que o *cluster* 1 é aquele que comporta os principais candidatos. Assim, planetas como Trappist-1e, Trappist-1f, Trappist-1c, K2-3d, Kepler 296-e, YZ Cet d, entre outros, devem ser alvos prioritários na busca por bioassinaturas, pois possuem ESI acima do valor utilizado como limite. É interessante observar que esses planetas orbitam estrelas com luminosidades dentro de uma faixa específica, que vai de -3,26 a -1,23 (log da luminosidade solar); percebe-se, também, que eles possuem raios entre 0,57 e 1,80 raios terrestres e massas entre 0,07 e 3,89 massas terrestres. É um *cluster* que pode abrigar planetas do tipo Marte, Terra, superterra e mininetunos, mostrando a diversidade de objetos passíveis de estudo.

A análise multinível indicou que os sistemas planetários desempenham um papel importante na evolução de seus exoplanetas, o que influencia a constituição do ESI, mostrando que efeitos como a luminosidade estelar, a temperatura estelar, a metalicidade estelar, entre outras características não estudadas neste trabalho, podem ser fundamentais no estudo do grau de similaridade desses planetas com a Terra. Ficou evidenciado de modo quantitativo, a partir do modelo multinível HLM2 nulo e dos dados relativos aos 240 exoplanetas estudados, que mais de 50% da variação do ESI é oriunda das características dos sistemas planetários.

Fica evidente que modelagens multiníveis podem ser ótimas ferramentas para a compreensão de sistemas complexos como aqueles relacionados à habitabilidade planetária, já que os modelos podem ser escalados, considerando níveis de complexidade maiores como, por exemplo, a inserção de variáveis explicativas e contextuais, assim como

a introdução da evolução temporal dos ambientes estudados.

Todos os códigos utilizados nesta pesquisa podem ser consultados por meio do link: <https://github.com/luander22/Exoplanetas.git>. Eles são oriundos da Ref. [11].

Sobre os autores

Natural de Ribeirão Preto - SP, Luander Bernardes (luander.uspicio@gmail.com) é Bacharel em Física Médica pela Universidade de São Paulo (USP) e Licenciado em Física pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. Possui Especialização em Ensino de Física pela Universidade Cruzeiro do Sul e em Data Science e Analytics pela USP. É Mestre e Doutor em Astrofísica pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP). Atualmente é professor substituto no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, docente dos cursos presenciais e EAD do Centro Universitário Estácio de Ribeirão Preto (Ciências Exatas e Licenciaturas em Física e Química), além de também coordenar estes cursos na modalidade EAD. Possui experiência nas áreas de astrobiologia, espectroscopia no infravermelho, modelos atmosféricos, habitabilidade planetária e técnicas de *machine learning* aplicadas ao estudo de exoplanetas.

Anna Carolina Martins (anna.martins@gmail.com) é natural de Montes Claros - MG. Bacharel em Economia pela Universidade Federal de Campinas, Mestra em Economia pela Universidade Federal de Ouro Preto, Doutora em Economia pela Universidade Estadual de Montes Claros e Especialista em Controladoria e Finanças pela USP. Atuou como pesquisadora visitante na Universidade de Cambridge e na Universidade de Sant'anna (2022-2023) pelo projeto *Economics of energy innovation and system transition* (EEIST). Possui experiência na área de teoria econômica, economia computacional, economia aplicada, modelos econométricos, mercado de energia e transição energética.

Referências

- [1] M. Mayor e D. Queloz, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, *Nature* **378**(6555), 355 (1995).
- [2] J. F. Kasting, D. P. Whitmire e R. T. Reynolds, *Habitable Zones around Main Sequence Stars*, *Icarus* **101**(1), 108 (1993).
- [3] R. Heller e J. Armstrong, *Superhabitable Worlds*, *Astrobiology* **14**(1), 50 (2014).
- [4] L. Zeng, D. Sasselov e S. Jacobsen, *Mass-Radius Relation for Rocky Planets based on PREM*, *The Astrophysical Journal* **819**, 127 (2016).
- [5] V. Stamenković et al., *The influence of pressure-dependent viscosity on the thermal evolution of super-Earths*, *The Astrophysical Journal* **748**(1), 41 (2012).
- [6] L. Noack e D. Breuer, *Plate tectonics on rocky exoplanets: Influence of initial conditions and mantle rheology*, *Planetary and Space Science* **98**, 41 (2014).
- [7] C. Dorn, L. Noack e A. B. Rozel, *Outgassing on stagnant-lid super-Earths*, *Astronomy & Astrophysics* **614**, A18 (2018).
- [8] L. Noack, A. Rivoldini e T. Van Hoolst, *Volcanism and outgassing of stagnant-lid planets: Implications for the habitable zone*, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **269**, 40 (2017).
- [9] National Aeronautics and Space Administration (NASA), *NASA Exoplanet Archive*, Página da internet. Disponível em <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>, acesso em mar. 2024.
- [10] D. Schulze-Makuch et al., *A Two-Tiered Approach to Assessing the Habitability of Exoplanets*, *Astrobiology* **11**(10), 1041 (2011).
- [11] L. P. Fávero e P. Belfiore, *Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com excel, SPSS e stata* (Elsevier, Rio de Janeiro, 2017).
- [12] L. Bernardes, *Machine Learning: uma ferramenta para o estudo de exoplanetas que podem apresentar atmosferas biogênicas*, Monografia (Especialização em Data Science e Analytics), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo (2023).
- [13] J. A. Hartigan e M. A. Wong, *Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm*, *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* **28**(1), 100 (1979).
- [14] R. A. Johnson e D. W. Wichern, *Applied multivariate statistical analysis* (Pearson Education, 2007), 6^a ed.
- [15] P. Dangeti, *Statistics for Machine Learning* (Packt Publishing, 2017).
- [16] S. W. Raudenbush e A. S. Bryk, *Hierarchical linear models: applications and data analysis methods* (Thousand Oaks Sage Publications, 2002).
- [17] B. Tabachnick e L. Fidell, *Using Multivariate Statistics: Pearson New International Edition* (Editora Pearson, 2013).

Lentes gravitacionais de baixo custo: unindo analogias de observações astronômicas e a teoria do lenteamento gravitacional em sala de aula

Danyel C. de Oliveira e Habib S. Dumet-Montoya

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

O efeito do lenteamento gravitacional oferece uma ampla riqueza imagens espetaculares do céu, que podem despertar a curiosidade de alunos dos primeiros anos do ensino e da população em geral. Neste trabalho, abordaremos uma introdução ao fenômeno de lenteamento gravitacional, com três focos principais: compreensão do fenômeno em imagens astronômicas, representação do fenômeno com equipamentos de baixo custo e, mostrar como a matemática elementar pode representar o lenteamento gravitacional em sistemas galácticos. Em particular, conseguiu-se ilustrar algumas imagens astronômicas e apresentou-se um método que permite encontrar soluções analíticas para a formação de imagens geradas pelo lenteamento gravitacional na escala galáctica sendo de fácil implementação computacional, e que poderá ser acessível a estudantes avançados do ensino médio e para alunos de graduação nas áreas de ciências da natureza, matemáticas e de engenharias interessados no assunto.

Abstract

The gravitational lensing effect offers a wide range of spectacular images of the sky that can awake the curiosity of students and the general population. In this work, we shall address an introduction to gravitational lensing with three main focus: understanding the phenomenon in astronomical images, illustrating the gravitational lensing effect with low-cost equipment, and show how a elementary mathematics can represents the galaxy-galaxy lensing. In particular, we illustrate some astronomical images, both with the low-cost equipment and with analytics solutions for the formation of images generated by gravitational lensing in galaxy scale. The solutions are easy to implement computationally, and can be accessible to advanced high school students and for undergraduate students in the STEM fields interested in the subject.

Palavras-chave: relatividade geral, astrofísica, lentes gravitacionais, arcos gravitacionais, equação algébrica.

Keywords: general relativity, astrophysics, gravitational lensing, gravitational arcs, algebraic equation

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43563](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43563)

1 Introdução

As primeiras ideias do lenteamento gravitacional (LG) remontam-se à época de Newton (que especulou a possibilidade do desvio da luz por corpos massivos), passando por John Mitchell e Cavendish, sendo este último o precursor do cálculo do ângulo de deflexão de um feixe de luz ao passar pelo sol, de acordo a

$$\hat{\alpha} = \frac{2GM}{c^2r}, \quad (1)$$

em que G é a constante de gravitação universal, c a velocidade escalar da luz e r define a distância de máxima aproximação entre o feixe de luz e o

sol (parâmetro de impacto). Entretanto, esse trabalho não foi publicado, mas refeito por Johann von Soldner em 1801 [1] e por Einstein utilizando o princípio de equivalência em 1911 [2]. Diante desse resultado, foram propostas duas expedições para verificação da fórmula [3–5], liderada por Carlos Dillon Perrine no Brasil em 1912 e a outra, liderada por E. Frindlay-Freundlich em 1914 na Crimeia. Felizmente as duas deram errado, pois atualmente sabe-se que esse resultado está errado.

Em 1915, após Einstein completar sua Teoria da Relatividade Geral (TRG), refez os cálculos e

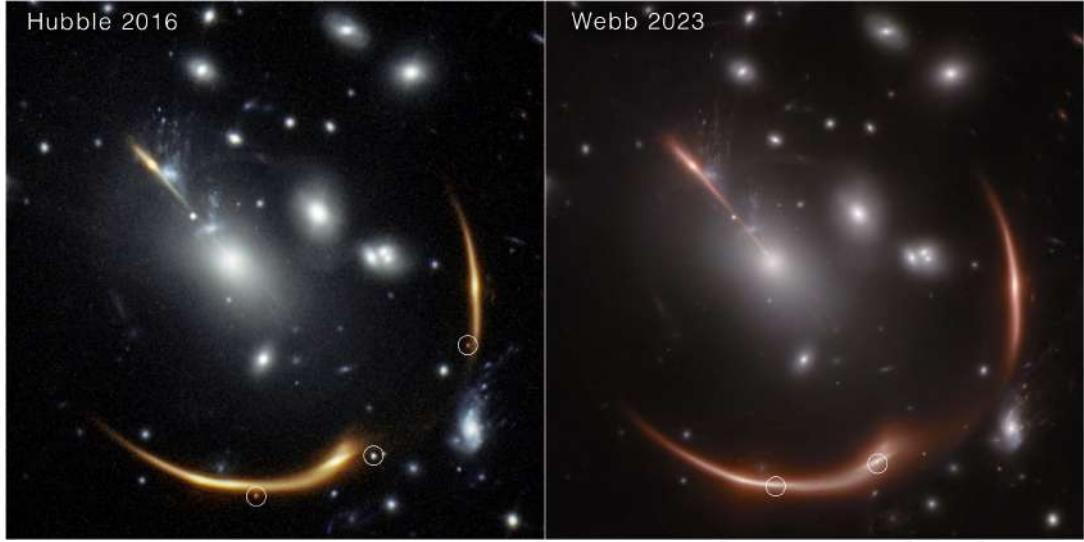


Figura 1: Imagens fortemente distorcidas de uma galáxia de fundo e as respectivas imagens múltiplas das Supernovas *Requiem* (esquerda) e *Encore* (direita). A observação foi possível devido ao LG da galáxia e das supernovas pelo Aglomerado MACS J0138. Créditos da Imagem do Hubble: NASA, ESA, STScI, Steve A. Rodney (University of South Carolina) and Gabriel Brammer (Cosmic Dawn Center/Niels Bohr Institute/University of Copenhagen). Créditos da Imagem do James Web: NASA, ESA, CSA, STScI, Justin Pierel (STScI) e Andrew Newman (Carnegie Institution for Science). Fonte <https://blogs.nasa.gov/webb/2023/12/21/supernova-encore-nasas-webb-spots-a-second-lensed-supernova-in-a-distant-galaxy/>.

dessa vez obteve

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2 r}, \quad (2)$$

que leva a um desvio de $1.74''$ próximo ao disco solar [6]. Em 1918 a baixa resolução dos equipamentos, utilizados na observação de um Eclipse em Washington, concluía que não era possível a deflexão da luz, descartando a TRG [7]. Entretanto, e felizmente, claro, em 1919 foram organizadas mais duas expedições, cujo objetivo era media da distância entre as estrelas à esquerda e à direita do Sol durante o eclipse e compará-las com as mesmas medidas efetuadas 6 meses antes [8]. A primeira equipe, liderada por Sir Arthur Eddington, a realizou na Ilha de Príncipe. A segunda, liderada por Andrew Claude de la Cherois Crommelin a realizou na cidade de Sobral do Estado do Ceará. O ângulo de deflexão obtido a partir dessas medidas foi de $1,61'' \pm 0,30''$,¹ resultado este que verificava a previsão da TRG [9].

De 1920 a 1975, essa época caracterizou-se por especulações como a existência de imagens múltiplas (miragens) de uma única fonte [10], ima-

gens duplas de estrelas é até a formação de imagem com aspecto anelar [11], possibilidade do uso de uma estrela atuar como lente de outra mais distante [12] e, numa escala observational maior, Fritz Zwicky, argumentou que as lentes gravitacionais podiam ser usadas como candidatos a Telescópios Naturais e, o fenômeno em si, podia ser utilizado para medir de maneira acurada a massa de objetos extragaláticos que atuarem como lentes [13, 14]. Com a descoberta dos *quasi stellar radio source* — quasares, que são fontes de rádio com aparência ótica aproximadamente estelar, possuidores de um espectro característico (que permitia observar as imagens múltiplas), serem altamente luminosos e estarem a distâncias cosmológicas da nossa galáxia (desvio ao vermelho alto), levou ao Jean M. Barnothy, considerá-los como objetos ideais para estudar o lenteamento gravitacional [15]. Essa conexão Quasar-LG, deu início ao desenvolvimento de muitos aspectos teóricos, dentre dos quais podemos citar o de Sjur Refsdal, que deduziu as equações básicas do LG, e mostrou que, medindo a separação angular e o tempo de chegada dos raios de luz da imagens lentadas, poderiam ser obtidas estimativas da taxa de expansão do Universo [16–18].

A partir de 1979, os grandes avanços na as-

¹Um segundo de arco, representado por "", que corresponde a $1/3.600$ de grau ou $1/1.2960.000$ da circunferência.

tronomia observacional, permitiram transformar as especulações em fatos devidamente comprovados. Dentro dos quais podemos citar a primeira detecção da imagem dupla do quasar Q0957+561 por Walsh, Carswell e Weyman [19], a identificação, em 1986, de imagens distorcidas em forma de arco no Aglomerado Abell A370 [20, 21], correspondendo, como sugerido por Packzyński [22] a imagens de galáxias de fundo, fortemente distorcidas por aglomerados de galáxias atuando como lentes [23]. Foi observado, em 1988, a formação de um anel luminoso (conhecido como Anel de Einstein) em imagens de fontes de raio [24], o lenteamento de um quasar por estrelas na galáxias que atuam como lente, correspondendo à primeira detecção de um evento de microlenteamento [25]. O advento de grandes levantamentos do céu por consórcios internacionais têm levado à descoberta de milhares de sistemas de LG, dentro dos quais podemos citar os apresentados nas referências [26–36]. Para uma leitura mais completa da descrição histórica, compreensão do fenômeno e informações sobre os levantamentos astronômicos, recomenda-se as referências [3, 37–40].

A inserção dos conteúdos apresentados até agora, no Ensino Básico, pode ser um desafio interessante. Entretanto, quando são consideradas as Competências Específicas das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) [41], especificamente quando analisamos a Competência Específica 2 (p. 558) encontramos:

“[...] os estudantes têm a oportunidade de elaborar reflexões que situem a humanidade e o planeta Terra na história do Universo, bem como inteirar-se da evolução histórica dos conceitos e das diferentes interpretações e controvérsias envolvidas nessa construção. [...] Nessa competência específica, podem ser mobilizados conhecimentos conceituais relacionados a: [...] modelos atômicos, subatômicos e cosmológicos; astronomia; evolução estelar; gravitação; mecânica newtoniana; previsão do tempo; história e filosofia da ciência; entre outros.”

Todavia, ao analisarmos a Habilidade EM13CNT204:

“Elaborar explicações, previsões e cálculos a respeito dos movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo com base na análise das interações gravitacionais, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como

softwares de simulação e de realidade virtual, entre outros)”.

Utilizar simulações e/ou representações de fenômenos da natureza podem oferecer benefícios significativos para uma experiência de aprendizado mais eficaz e envolvente no contexto de ensino.

Neste trabalho, objetivando motivar o estudo do LG e ao mesmo tempo, produzir material que possa ilustrar e contribuir à discussão sobre o fenômeno entre estudantes de Ensino Médio, apresentaremos as principais definições e regimes do LG na Seção 2. A seguir, ao invés de adentrar à formulação matemática, apresentaremos a confecção de uma lente gravitacional de baixo custo na Seção 3. Como toda observação e (ilustração da mesma) requer um(s) modelo(s) matemático(s), na Seção 4 explicaremos como trabalhar os modelos de lentes mais simples que descrevem em boa aproximação o lenteamento em galáxias-galáxias, para que desse modo os estudantes possam compatibilizar os resultados teóricos com os observacionais. Por fim, na Seção 5 apresentaremos algumas discussões e perspectivas deste trabalho.

2 Lentes gravitacionais: panorama geral de e regimes de lenteamento

Após essa breve resenha apresentada na Seção 1, os leitores interessados no assunto poderão compreender que o LG é a deflexão da luz, emitida por fontes estelares (estrelas, planetas, quasares, supernovas, galáxias, etc.), ao atravessar uma lente, isto é, uma área no céu que contém uma distribuição de matéria (estrelas, objetos compactos, galáxias, aglomerados de galáxias, estrutura em grande escala, etc) e que é observada por telescópios espaciais como o [Hubble](#) e o [James Webb](#) ou, na Terra como os telescópios [Blanco](#), [Keck](#), o [Very Large Telescope VLT](#), o [Subaru](#), o [Southern Astrophysical Research SOAR](#), o [Canada-France-Hawaii CFHT](#), o [Dark Energy Survey DES](#), dentre outros.

Essa deflexão pode ser observada na forma de: a) posições aparentes; b) aumento da magnificação (área efetiva observada); c) distorções da forma ou; d) multiplicidade de imagens (são observadas mais de uma imagem de um mesma fonte). Em particular, o que torna interessante

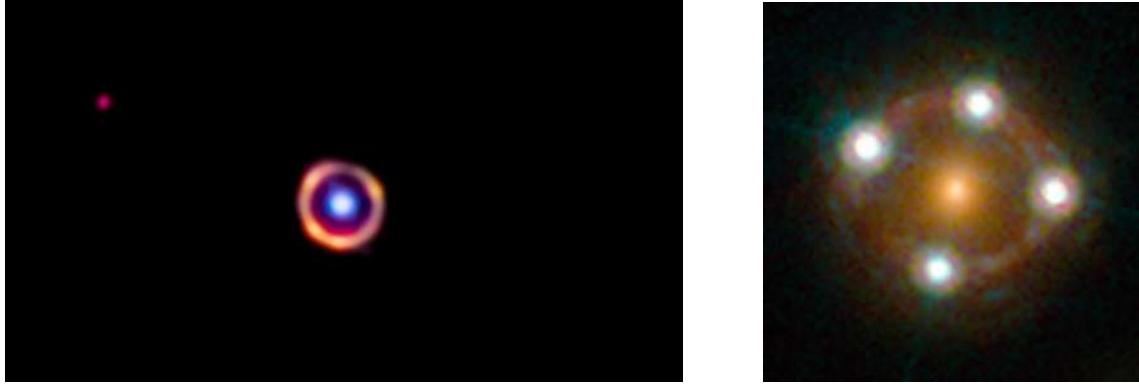


Figura 2: Imagens de fontes que sofreram LG por galáxias. Esquerda: Anel de Einstein detectado pelo Telescópio James Webb. Esse anel é devido ao LG de uma galáxia distante, rica em moléculas orgânicas complexas, quando o universo tinha aproximadamente 1,5 bilhões de anos. Créditos: J. Spilker/S. Doyle, NASA, ESA, CSA. Fonte: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52958010034/in/album-72177720305127361/>. Direita: Imagens do Quasar HE0435-1223 que sofreu LG por uma galáxia. Créditos: ESA/Hubble, NASA, Suyu et al. Fonte: <https://esahubble.org/images/heic1702e/>.

essa deflexão é que depende apenas da distribuição de matéria (tanto bariônica quanto escura) nas lentes (sem uso de hipóteses sobre processos físicos ou estados dinâmicos) e das distâncias cosmológicas entre o observador, lente e a fonte.

Por esse motivo, o lenteamento gravitacional constitui de fato uma das ferramentas mais poderosas para estudar o conteúdo de matéria no universo, devido principalmente a sua natureza puramente gravitacional, e que permite ao mesmo tempo complementar outros observáveis cosmológicos [18, 42].

O efeito do LG pode ser dividido de acordo com as escalas astronômicas nas quais ocorrem e também por sua intensidade [43–45]. Referente às escalas, o LG pode ser classificado em micro, milí ou o e macrolenteamento. A denominação está em função da separação angular das imagens ou do raio de Einstein. No caso do microlenteamento a separação angular típica é de microsegundos de arco $10^{-6}''$ e ocorre principalmente quando as lentes são estrelas na nossa galáxia. De forma análoga, no mililenteamento, a separação angular é da ordem de $10^{-3}''$ e ocorre quando as lentes são estrelas de outras galáxias. Ressalta-se que os instrumentos atuais não têm a precisão suficiente para poder observar, nestas escalas, as imagens múltiplas, porém, conseguem observar a variação do brilho superficial (curva de luz) em função do tempo, considerando o movimento relativo entre a fonte, lente e o observador [45]. No macrolenteamento a separação angular das imagens é da

ordem de "°, o que de fato permite ser observado pelos telescópios, em galáxias ou aglomerados de galáxias nos levantamentos de grandes áreas do céu.

Em relação à intensidade, o efeito de lenteamento gravitacional é dividido em fraco e forte. No caso do lenteamento fraco as imagens dos objetos de fundo são ligeiramente distorcidas, sendo que a detecção desse efeito requer análises estatísticas de milhares de objetos. Os aspectos matemáticos da modelagem deste fenômeno foram desenvolvidos por Gunn [46] e Blandford e Narayan [42]. Para os leitores interessados há um excelente artigo de revisão escrito por Bartelmann e Schneider [47].

Já o lenteamento forte, que ocorre em galáxias massivas ou em aglomerados de galáxias, tem como característica principal a formação de imagens múltiplas, magnificadas e/ou fortemente distorcidas, como mostradas por exemplo na Figura 1. Mas não unicamente são formadas imagens múltiplas (quase colineares) ou em forma de arcos, aliás quando um determinado tipo de lente está perfeitamente alinhada com uma fonte pode dar a formação de anéis luminosos, conhecidos como Anéis de Einstein ou podem dar origem ao surgimento de imagens dispostas de modo a dar aparência de uma cruz, conhecidas como Cruz de Einstein. Alguns exemplos dessas configurações de imagens estão sendo mostradas na Figura 2. É importante reforçar que sem a formação do sistema observador-lente-fonte não teria sido pos-



Figura 3: Lente de vidro semi-polida com rugosidades. Fonte: os autores.

sível observar as imagens mostradas nas Figuras 1 e 2, fato este que reforça a característica das Lentes Gravitacionais como Telescópios Naturais acunhados por Zwicky [13].

3 Lentes gravitacionais de baixo custo

A seguir apresentaremos sugestões para confecção de “lentes gravitacionais” de baixo custo [48, 49]. A ideia principal é empregar as propriedades de refração da luz como uma representação do lenteamento gravitacional é poder usá-las dentro de sala de aula ou até em exposições científicas que tenham como público alvo a população local.

Na prática, para a confecção delas precisa ser quebrada a haste de uma taça de vinho (pode ser de vidro ou de plástico) próximo da base e logo lixar. Embora o procedimento seja simples, será necessário utilizar equipamento de proteção individual² e uma superfície estável, plana e não inclinada (nivela), de modo a garantir que a superfície superior da haste quebrada seja paralela à base da taça.

Para esse procedimento pode ser utilizado um

²Recomenda-se que o equipamento de proteção individual seja formado por um capacete e luva de segurança, protetor facial, camisa com material reforçado (não pode ser manga regata) e calçados para o caso de fragmentos de vidros caírem porventura.



Figura 4: Lente de vidro com o topo polido. Fonte: os autores.

alicate universal ou de bico longo e pressionar um ponto conveniente à medida que seja provocado torque até que se reparta. A seguir, utiliza-se uma lixa de massa com granulação próxima a 100 para aplanar o topo da lente, até o ponto em que esse plano fique paralelo à base. Após esse processo, a face menor ficará rugosa e translúcida, como mostrado na Figura 3. Para contornar esse problema, utilizam-se lixas d’água de granulação diferente, começando pelo número de granulação menor, observando que conforme mais grosso for o grão da lixa, menor é o número dela. Para o produto aqui apresentado (Figura 4), utilizou-se gradativamente lixas com granulações iguais a 280, 600 e 1200, respectivamente.

É importante utilizar regularmente um pano úmido para limpar a superfície onde está lixando o material. Isso impede que detritos arranhem/risquem o vidro ao longo do processo. Recomenda-se que ao lixar, faça movimentos com baixa amplitude, que ajudará a não desgastar as bordas da superfície.

Através da lente confeccionada podemos representar a distorção do espaço-tempo utilizando uma folha de papel com pauta de uma forma simples como mostrado na Figura 5. Seguindo nesta linha, desenhou-se um círculo (de modo a simbolizar uma fonte circular extensa) em um fundo negro³ e procedeu-se a formar o sistema fonte-

³Recomenda-se um local com baixa luminosidade para realizar a representação de formação da(s) imagem(ens).



Figura 5: Representação da Distorção do Espaço-Tempo. As linhas horizontais representam raios de luz que viajam por um espaço-tempo plano (esquerda) e o deformado por uma distribuição de matéria (direita). Fonte: os autores.

lente-observador.

Quando alinhados perfeitamente a fonte, lente e o observador, obteve-se a imagem de um anel luminoso, o conhecido Anel de Einstein, como mostrado no painel esquerdo da Figura 6. Logo em seguida, procurou-se desalinear a lente da fonte, de modo a observar imagens em forma de arco, de modo a representar os conhecidos arcos gravitacionais, como mostrado no painel central da Figura 6. Mas como é conhecido das observações astronômicas, nem sempre são observadas duas imagens com forma de arcos e sim, imagens em número maior. Isso ocorre quando a lente não possui uma simetria axial (circular). Um dos modelos simples é aquele que contempla uma lente cuja distribuição superficial de massa possui uma simetria elíptica. Com esse intuito, para poder representar o lenteamento devido a uma distribuição de massa desse tipo, inclinou-se a lente de modo que ao ser projetada, seja vista uma elipse e ao deixar perfeitamente alinhada com a fonte, observou-se a formação de quatro imagens formando uma cruz, representando assim a Cruz de Einstein, como mostrado painel direito da Figura 6.

Dessa maneira, estamos representando de uma forma simples, algumas das mais espetaculares imagens de lenteamento gravitacionais obtidas pelos telescópios, mostrados neste trabalho nas Figuras 1 e 2.

Além disso, há a possibilidade de serem utilizados como fonte: luz de velas, diodos emissores de luz e/ou lanternas de celulares.

4 Modelagem matemática do LG

Para compatibilizar as imagens mostradas na seção anterior, revisitaremos a teoria do LG. Para os leitores interessados, que não tenham domínio do inglês, recomenda-se a leitura dos capítulos introdutórios das teses indicadas nas referências [38–40]. Para os leitores com um domínio mais avançado, recomenda-se a leitura dos livros indicados nas referências [43–45].

Em essência o LG possui alguns ingredientes chaves, como a fonte, a lente, as distâncias cosmológicas e uma equação, que relaciona a posição da fonte com as imagens lenteadas, conhecida como equação da lente. Para cada um desses ingredientes há modelos matemáticos (alguns deles bem simples) e que podem ser abordados em sala de aula.

Pois bem, o primeiro a ser considerado é ter uma visão esquemática do LG (Figura 7). As distâncias D_{OS} , D_{OL} e D_{LS} são as distâncias de Diâmetro Angular entre o observador e a fonte, entre o observador e a lente e, entre a lente e a fonte, respectivamente. O ângulo β representa a posição angular real da fonte e o ângulo $\hat{\theta}$ corresponde à posição angular onde a observamos, após o feixe de luz sofrer a deflexão caracterizada pelo ângulo $\hat{\alpha}$. Esses ângulos estão relacionados (supondo que $|\hat{\theta}| \ll 1$, $|\hat{\beta}| \ll 1$ e $|\hat{\alpha}| \ll 1$) [38] pela seguinte equação:

$$\vec{\theta}D_{OS} = \vec{\beta}D_{OS} + \hat{\alpha}D_{LS}. \quad (3)$$

Todavia, podemos relacionar as posições angulares da fonte e da(s) imagem(ens) com os parâmetros de impacto ξ e $\vec{\eta}$ no plano das lentes e das

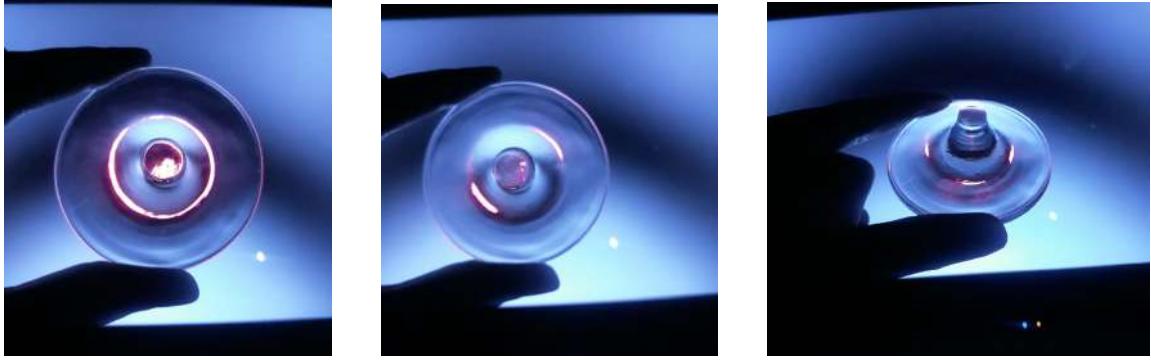


Figura 6: Representações de um Anel de Einstein (esquerda), de Arcos Gravitacionais(centro) e de uma Cruz de Einstein (direita). Fonte: os autores

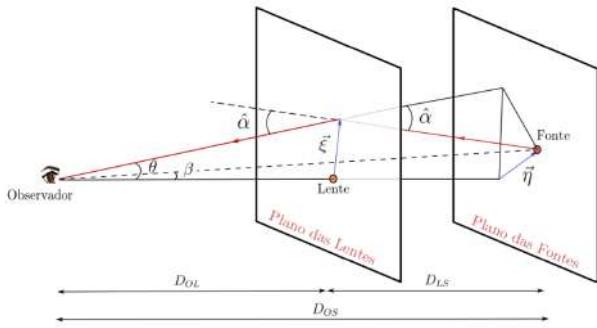


Figura 7: Representação esquemática do LG. Imagem retirada da Referência [38].

fontes, respectivamente, a traves das expressões

$$\vec{\xi} = D_{OL}\vec{\theta}, \quad \vec{\eta} = D_{OS}\vec{\beta}. \quad (4)$$

Na prática, resolver a equação (3), ou sua versão alternativa com o uso da equação (4), requer cálculos numéricos, muitas vezes complicados e que fogem do escopo de uma sala de aula. Felizmente, no LG podemos escolher parâmetros de escala adequados que possibilitam excluir as distâncias cosmológicas dos cálculos e ainda, simplificam a matemática do problema, pois ao invés de trabalhar com uma equação dimensional, passamos a utilizar equações adimensionais [43–45]

$$\vec{y} = \vec{x} - \vec{\alpha}(\vec{x}) \quad (5)$$

em que $\vec{y} = \vec{\eta}/\eta_0$, $\vec{x} = \vec{\xi}/\xi_0$ e

$$\vec{\alpha}(\vec{x}) = \left(\frac{D_{OL}D_{LS}}{\xi_0 D_{OS}} \right) \vec{\alpha}(\xi_0 \vec{x}). \quad (6)$$

sendo a escolha de ξ_0 arbitrária. A informação sobre a distribuição de matéria está contida no ângulo de deflexão, equação (6).

4.1 Modelo de lente gravitacional

Muitos modelos de lentes utilizados para a modelagem de lenteamento gravitacional forte [50] requerem o uso de técnicas numéricas para poder inverter a equação da lente. Contudo, há uns modelos de lente que representam bem o LG em sistemas galáxia-galáxia, que além de constituírem excelentes aproximações para a distribuição total de matéria, proporcionam uma simplicidade computacional única [51–57]. Esses modelos são baseados no perfil de densidade da Esfera Isotérmica Singular, com simetria axial, cujo ângulo de deflexão é [3, 38, 40]

$$\vec{\alpha}(\vec{x}) = \cos \phi \hat{e}_1 + \sin \phi \hat{e}_2. \quad (7)$$

Todavia, as generalizações desse modelo para distribuições de matéria com simetria elíptica, que ajudam a reproduzir imagens múltiplas em número superior a 2, têm a particularidade de que o ângulo não depende da distância. Por exemplo, para um modelo com potencial elíptico (que representa bem uma distribuição elíptica até uma elipticidade $\varepsilon_\varphi \leq 0.2$ como mostrado em [40]) o ângulo de deflexão é

$$\vec{\alpha}_\varphi(\vec{x}) = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \left(\frac{b_\varphi \cos \phi}{a_\varphi} \hat{e}_1 + \frac{a_\varphi \sin \phi}{b_\varphi} \hat{e}_2 \right), \quad (8)$$

em que

$$\Delta = a_\varphi^2 \sin^2 \phi + b_\varphi^2 \cos^2 \phi, \quad (9)$$

com a_φ e b_φ ($a_\varphi > b_\varphi$) definem a elipticidade do potencial da lente

$$\varepsilon_\varphi = 1 - \frac{b_\varphi}{a_\varphi}. \quad (10)$$

A elipticidade refere-se ao parâmetro que mede o “achatamento” do potencial gravitacional (quanto mais próxima de zero, o potencial aproximasse bem da forma circular). Sendo a mesma definição aplicável a uma distribuição de massa.⁴

4.2 Resolvendo a Equação da Lente

Antes de adentrar especificamente na solução da equação da lente, saibamos que a equação para calcular o tempo de percurso no movimento oblíquo, fornecerá pistas para resolver o problema de lenteamento gravitacional por modelos isotérmicos singulares. Estamos nos referindo a equação algébrica de segundo grau do tipo

$$x^2 + 2px + q = 0. \quad (11)$$

A qual tem soluções — reais — da forma

$$x^{(\pm)} = -p \pm \sqrt{p^2 - q}, \quad (12)$$

desde que o argumento da raiz quadrada seja maior ou igual do que zero. Todavia, mesmo que p e q sejam funções de alguma variável (desde que não seja x), a forma funcional da solução (12) é mantida. Mas qual a relação desta equação, com a equação da lente, usualmente altamente não linear em x ? Pois bem, quando consideramos a equação (5), com ângulo $\vec{\alpha}$ ⁵ definido de acordo a (7) ou (8), (que independem da distância radial) decorrerá uma equação de segundo grau, claro que com outros símbolos ou letras, mas o procedimento de solução permanece o mesmo.

O primeiro passo é desenhar a fonte no correspondente plano. Essa fonte, de raio $|\vec{R}_0|$ estará centralizada na posição \vec{s} e será dividida em N pontos, cada um em uma posição \vec{y}_k . A ideia é inserir o ponto $\vec{y}_k = \vec{s} + \vec{R}_0$, na equação da lente (eq. (5)), de modo a obtermos a seguinte equação (vetorial):

$$\vec{R}_0 = \vec{x}_k - (\vec{\alpha} + \vec{s}), \quad (13)$$

⁴Adentrar na relação entre potencial gravitacional, distribuição superficial de massa e ângulo de deflexão, requer conhecimento de cálculo diferencial e integral e como o foco principal é o uso de uma matemática elementar não está sendo incluído neste trabalho

⁵Muito embora o ângulo de deflexão do modelo com distribuição de matéria elíptica não depende da distância, as expressões podem ser não tão conhecidas por estudantes de ensino médio. Contudo, as soluções apresentadas nas equações (20) e (21), são válidas. Basta substituir as expressões das componentes do ângulo de deflexão nas equações (18) e (19).

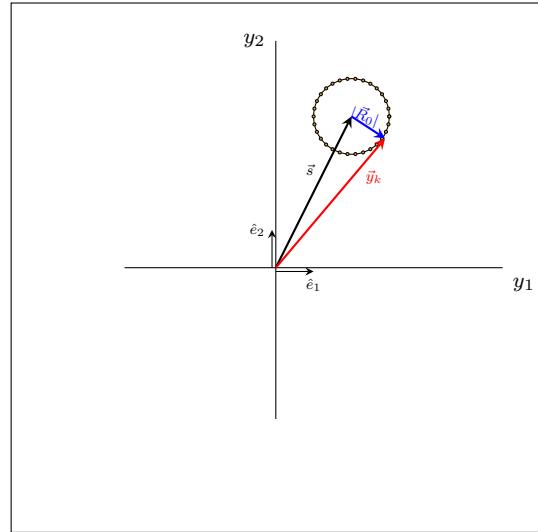


Figura 8: Representação esquemática da parametrização de uma fonte extensa, de raio R_0 e posição \vec{s} , como uma coleção de N fontes pontuais. Fonte: os autores.

sendo

$$\vec{\alpha} = \alpha_1 \hat{e}_1 + \alpha_2 \hat{e}_2. \quad (14)$$

e de modo análogo

$$\vec{s} = s_1 \hat{e}_1 + s_2 \hat{e}_2. \quad (15)$$

Se escolhermos trabalhar com coordenadas cartesianas, os cálculos poderão se tornar bem dispendiosos. Contudo, ao trabalharmos com coordenadas polares, podemos expressar

$$\vec{x} = r_k \hat{e}_r, \quad \hat{e}_r = \cos \phi_k \hat{e}_1 + \sin \phi_k \hat{e}_2, \quad (16)$$

em que r_k a distância radial a partir da origem no plano das lentes da posição da imagem(ens) correspondente ao ponto \vec{y}_k . A seguir, calculamos a norma (módulo) do vetor \vec{R}_0 , lembrando que $|\vec{R}_0|^2 = \vec{R}_0 \cdot \vec{R}_0$. Desse modo, da equação (13), temos

$$\begin{aligned} r_k^2 &- 2r_k [(\alpha_1 + s_1) \cos \phi_k + (\alpha_2 + s_2) \sin \phi_k] \\ &+ |\vec{\alpha} + \vec{s}|^2 - R_0^2 = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Assim, ao chamar de

$$p_k = (\alpha_1 + s_{0,1}) \cos \phi_k + (\alpha_2 + s_{0,2}) \sin \phi_k \quad (18)$$

e

$$q = (\alpha_1 + s_1)^2 + (\alpha_2 + s_2)^2 - R_0^2, \quad (19)$$

a solução da equação algébrica (17) é dada pela expressão dada na equação (12). Observando que

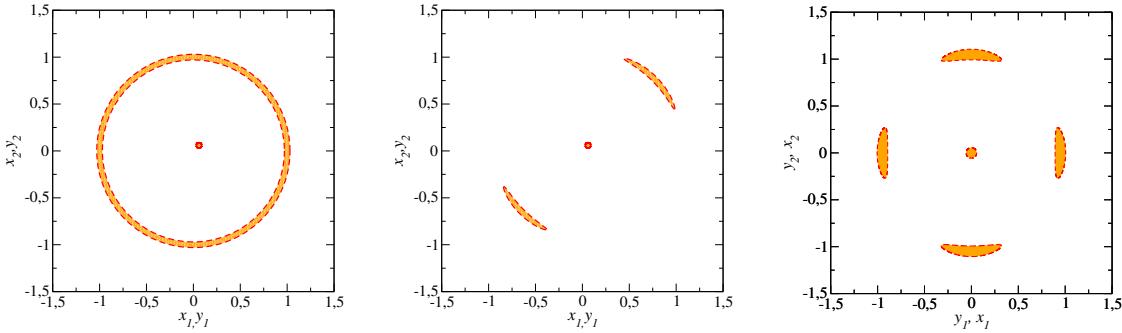


Figura 9: Soluções do Lenteamento de uma fonte circular de raio 0,03 por uma Esfera Isotérmica Singular perfeitamente alinhada(painel esquerdo) formando um Anel de Einstein, ligeiramente desalinhada(painel central) formando Arcos Gravitacionais e perfeitamente alinhada com uma lente do tipo Singular Isotérmico com Potencial Elíptico ($\varepsilon_\varphi = 0.1$), formando uma Cruz de Einstein (painel direito). Fonte: os autores

cada uma das soluções têm uma determinada interpretação. A cada ponto \vec{y}_k corresponderá um ponto “externo” dado por

$$r_k^{(+)} = -p_k + \sqrt{p_k^2 - q} \quad (20)$$

e um ponto “interno” dado por

$$r_k^{(-)} = -p_k - \sqrt{p_k^2 - q}. \quad (21)$$

De modo que ao efetuar uma varredura do ângulo ϕ_k desde 0 até 2π , em todos aqueles pontos que

$$p_k^2 - q \geq 0. \quad (22)$$

será formada uma borda externa, eq. (20), e uma interna, eq. (21), obtendo dessa maneira a(s) imagem(ens) de fonte extensa. Para efetuar o gráfico das fontes e imagens podem ser utilizados por exemplo o [Python](#) ou o [GeoGebra](#) (que vem com um formato mais amigável).

No caso de um alinhamento perfeito entre a lente, fonte e observador, que corresponde a $\vec{s} = \vec{0}$, e quando $|R_0| \leq 1$ as soluções correspondem a duas bordas com forma de círculo, uma de raio $r^{(+)} = 1 + |\vec{R}_0|$ e outra de raio $r^{(-)} = 1 - |\vec{R}_0|$, as quais em conjunto formam a imagem de um Anel, como mostrado no painel esquerdo da Figura 9. De maneira similar, ao deslocar ligeiramente a fonte da origem, haverá o surgimento de bordas externas e internas que formam imagens em forma de arcos, como mostrado no painel central da Figura 9 e por último, quando considerarmos o ângulo de deflexão dado pela Eq. (8) obteremos a configuração de 04 imagens em forma de cruz, como mostrado no painel direito da Figura 9.

5 Discussões e perspectivas

A inserção de conteúdos de física moderna no ensino básico poder ser um desafio em razão da complexidade dos conceitos envolvidos e a necessidade de adaptação desses conteúdos para atender ao nível de compreensão dos discentes. Nesse contexto, a sugestão da confecção de um aparelho de baixo custo para a representação de fenômenos relacionados às lentes gravitacionais e à teoria da relatividade geral pode se mostrar relevante como recurso educacional. A ferramenta tem a potencialidade de representar fenômenos físicos abstratos e de difícil visualização em seu cotidiano (como é o caso do LG por estrelas ou galáxias) e, desta forma, há uma possibilidade de tornar mais acessíveis a compreensão dos conceitos e aplicações deste fenômeno.

Um outro fator a ser considerado da “lente gravitacional de baixo custo” é seu caráter interativo, promovendo um aprendizado mais ativo, isto é, mais centrado no estudante. Através do movimento relativo da lente em relação a fonte e o observador o aluno será capaz de perceber a geração de diferentes padrões de imagens, como dispositas na Figura 6 e conectar com a teoria, a qual também permite reproduzir essas configurações de imagens como mostradas na Figura 9.

Muito embora a lente gravitacional de baixo custo represente uma lente pontual, como apontado na referência [49], a solução da equação da lente para esse tipo de ângulo de deflexão acarreta uma equação quârtica, que não é trivial de ser encontrada a solução e até onde é conhecido pelos autores, não foi observado até agora o LG forte por uma estrela. Por esse motivo, foi utilizada

unicamente com um ilustrador do efeito, e já que a formação de anéis luminosos, arcos ou imagens múltiplas ocorrem na escala galáctica, e todavia, pela sua simplicidade matemática, utilizou-se os modelos baseados no perfil isotérmico singular. Assim, a curto prazo, pode ser apresentado a confecção de uma lente que represente o perfil isotérmico singular.

Por outro lado, apesar das soluções apresentadas na Seção 4.2, já tenham sido obtidas em trabalhos anteriores [3, 38, 40], o procedimento utilizado para obter a solução fez uso direto das propriedades do produto escalar de dois vetores unitários perpendiculares, o que simplificou a obtenção das soluções. O Código escrito na linguagem C pode ser fornecido aos interessados, sendo suficiente enviar um e-mail aos autores.

Do ponto de vista da modelagem matemática, este trabalho pode ser generalizado ao trabalhar com duas quantidades do LG, conhecidas como convergência e cisalhamento externos que representam o efeito de distribuições de matéria próxima da lente. Nesse caso, as soluções (para fontes extensas circulares) mantêm-se válidas, mas será necessário redefinir as equações (18) e (19). Também poderia ser pensando em obter a solução para fontes elípticas (inclusive com orientação). Entretanto, recomenda-se que este último trabalho possa ser foco de um aluno de Vocação Científica.

Sobre os autores

Danyel C. de Oliveira (oliveira.daan@hotmail.com) é graduado em Licenciatura em Física pelo CEFET/RJ *campus* Nova Friburgo. Durante a trajetória acadêmica, realizou Mobilidade Internacional para o Instituto Politécnico de Bragança (*campus* Santa Apolónia) em Portugal. Atualmente atua no ensino básico como professor de física e robótica das escolas das redes municipais de Macaé e de Rio das Ostras. É aluno do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) no Instituto Politécnico da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Habib S. Dúmet-Montoya (habib@macae.ufrj.br) é Professor Doutor do Programa de Ciências da Natureza e suas Tecnologias do Instituto Politécnico da UFRJ, sediado na cidade de

Macaé. É professor permanente do Programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) no Instituto Politécnico da UFRJ.

Referências

- [1] S. L. Jaki, *Johann Georg von Soldner and the gravitational bending of light, with an English translation of his essay on it published in 1801*, Foundations of Physics **8**(11–12), 927 (1978).
- [2] A. Einstein, *Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*, Annalen der Physik **340**(10), 898 (1911).
- [3] M. Makler, *Lentes Gravitacionais: Um Rico Recurso Didático na Ocasião da Celebração dos 100 Anos do Eclipse de Sobral*, Conexões - Ciência e Tecnologia **13**(2), 21 (2019).
- [4] I. d. C. Moreira e A. A. P. Videira, *Einstein e o Brasil* (Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1995).
- [5] K. Brecher, *Revealing the Universe* (MIT Press, Cambridge, 1982).
- [6] A. Einstein, *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Annalen der Physik **354**(7), 769 (1916).
- [7] R. S. Ellis, *Gravitational lensing: a unique probe of dark matter and dark energy*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **368**(1914), 967 (2010).
- [8] K. d. S. Oliveira Filho e M. d. F. O. Saraiva, *Astronomia e Astrofísica* (Livraria da Física, São Paulo, 2004).
- [9] F. W. Dyson, A. S. Eddington e C. R. Davidson, *The determination of the Deflection of the Light by the Sun's Gravitational Field, from observation made at total Eclipse of May 29, 1919*, Memoirs of the Royal Astronomical Society **62** (1920).
- [10] A. S. Eddington, *Space, Time and Gravitation* (Cambridge University Press, Cambridge, 1920).

- [11] O. Chwolson, *Über eine mögliche Form fiktiver Doppelsterne*, *Astronomische Nachrichten* **221**(20), 329 (1924).
- [12] A. Einstein, *Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field*, *Science* **84**(2188), 506 (1936).
- [13] F. Zwicky, *Nebulae as Gravitational Lenses*, *Physical Review* **51**(4), 290 (1937).
- [14] F. Zwicky, *On the Probability of Detecting Nebulae Which Act as Gravitational Lenses*, *Physical Review* **51**(8), 679 (1937).
- [15] J. M. Barnothy, *Quasars and the Gravitational Image Intensifier*, *The Astronomical Journal* **70**, 666 (1965).
- [16] S. Refsdal e H. Bondi, *The Gravitational Lens Effect*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **128**(4), 295 (1964).
- [17] S. Refsdal, *On the Possibility of Determining Hubble's Parameter and the Masses of Galaxies from the Gravitational Lens Effect*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **128**(4), 307 (1964).
- [18] S. Refsdal, *On the Possibility of Testing Cosmological Theories from the Gravitational Lens Effect*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **132**(1), 101 (1966).
- [19] D. Walsh, R. F. Carswell e R. J. Weymann, *0957 + 561 A, B: twin quasistellar objects or gravitational lens?*, *Nature* **279**(5712), 381 (1979).
- [20] G. Soucail et al., *A blue ring-like structure in the center of the A 370 cluster of galaxies*, *Astronomy & Astrophysics* **172**, L14 (1987).
- [21] R. Lynds e V. Petrosian, *Luminous Arcs in Clusters of Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **336**, 1 (1989).
- [22] B. Paczynski, *Giant luminous arcs discovered in two clusters of galaxies*, *Nature* **325**(6105), 572 (1987).
- [23] G. Soucail et al., *The giant arc in A 370 : spectroscopic evidence for gravitational lensing from a source at Z=0.724.*, *Astronomy & Astrophysics* **191**, L19 (1988).
- [24] J. N. Hewitt et al., *Unusual radio source MG1131+0456: a possible Einstein ring*, *Nature* **333**(6173), 537 (1988).
- [25] M. J. Irwin et al., *Photometric variations in the Q2237 + 0305 system - First detection of a microlensing event*, *The Astronomical Journal* **98**, 1989 (1989).
- [26] K. U. Ratnatunga, R. E. Griffiths e E. J. Ostrander, *The Top 10 List of Gravitational Lens Candidates from the HUBBLE SPACE TELESCOPE Medium Deep Survey*, *The Astronomical Journal* **117**(5), 2010 (1999). [ArXiv:astro-ph/9902100](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9902100).
- [27] C. D. Fassnacht et al., *Strong Gravitational Lens Candidates in the GOODS ACS Fields*, *The Astrophysical Journal* **600**(2), L155 (2004). [ArXiv:astro-ph/0309060](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309060).
- [28] P. J. Marshall et al., *An Automated Search for Gravitational Lenses in the HST Imaging Archive*, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts* (2005), vol. 207, 200.03.
- [29] A. S. Bolton et al., *The Sloan Lens ACS Survey. I. A Large Spectroscopically Selected Sample of Massive Early-Type Lens Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **638**(2), 703 (2006). [ArXiv:arXiv:astro-ph/0511453](https://arxiv.org/abs/arXiv:astro-ph/0511453).
- [30] L. V. E. Koopmans et al., *The Sloan Lens ACS Survey. III. The Structure and Formation of Early-Type Galaxies and Their Evolution since $z \approx 1$* , *The Astrophysical Journal* **649**(2), 599 (2006). [ArXiv:arXiv:astro-ph/0601628](https://arxiv.org/abs/arXiv:astro-ph/0601628).
- [31] L. A. Moustakas et al., *A Strong-Lens Survey in AEGIS: The Influence of Large-Scale Structure*, *The Astrophysical Journal* **660**(1), L31 (2007). [ArXiv:astro-ph/0607239](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0607239).
- [32] C. Faure et al., *First Catalog of Strong Lens Candidates in the COSMOS Field*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **176**(1), 19 (2008). [ArXiv:0802.2174](https://arxiv.org/abs/0802.2174).
- [33] N. Jackson, *Gravitational lenses and lens candidates identified from the COSMOS fi-*

- eld*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **389**(3), 1311 (2008). [ArXiv: 0806.3693](#).
- [34] J. R. Brownstein et al., *The BOSS Emission-Line Lens Survey (BELLS). I. A Large Spectroscopically Selected Sample of Lens Galaxies at Redshift ~ 0.5* , *The Astrophysical Journal* **744**(1), 41 (2011). [ArXiv:1112.3683](#).
- [35] R. A. Cabanac et al., *The CFHTLS strong lensing legacy survey. I. Survey overview and T0002 release sample*, *Astronomy & Astrophysics* **461**(3), 813 (2006). [ArXiv: astro-ph/0610362](#).
- [36] A. More et al., *The CFHTLS-Strong Lensing Legacy Survey (SL2S): Investigating the Group-scale Lenses with the SARCS Sample*, *The Astrophysical Journal* **749**(1), 38 (2012). [ArXiv:1109.1821](#).
- [37] J. A. S. Lima e R. C. Santos, *Do Eclipse Solar de 1919 ao Espetáculo das Lentes Gravitacionais*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**(suppl 1) (2019).
- [38] V. P. Freitas, *Arcos Gravitacionais na Escala Galáctica: Modelagem Analítica e Seções de Choque.*, Tese de Doutorado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro (2018). Disponível em https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=6333965, acesso em fev. 2024.
- [39] G. B. Caminha, *Um prelúdio para o lenteamento gravitacional forte em levantamentos de grandes áreas.*, Tese de Doutorado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro (2013). Disponível em https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=599511, acesso em fev. 2024.
- [40] H. S. Dúmet-Montoya, *Modelagens Semicanalíticas para Arcos Gravitacionais: Seção de Choque e Método Perturbativo em Lentes Pseudoelípticas.*, Tese de Doutorado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro (2011). Disponível em <https://cbpfindex.cbpf.br/index.php?module=main&moduleFile=pubDetails&pubId=5823&typeId=9>, acesso em fev. 2024.
- [41] Brasil, Ministério da Educação, *Base Nacional Curricular Comum*, Brasília (2018).
- [42] R. D. Blandford e R. Narayan, *Cosmological Applications of Gravitational Lensing*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **30**(1), 311 (1992).
- [43] P. Schneider, J. Ehlers e E. E. Falco, *Gravitational Lenses* (Springer-Verlag, Berlin, 1992).
- [44] A. O. Petters, H. Levine e J. Wambsganss, *Singularity theory and gravitational lensing* (Birkhäuser, Berlin, 2001).
- [45] S. Mollerach e E. Roulet, *Gravitational lensing and microlensing* (WORLD SCIENTIFIC, 2002).
- [46] J. E. Gunn, *On the Propagation of Light in Inhomogeneous Cosmologies. I. Mean Effects*, *The Astrophysical Journal* **150**, 737 (1967).
- [47] M. Bartelmann e P. Schneider, *Weak gravitational lensing*, *Physics Reports* **340**(4–5), 291 (2001). [ArXiv:astro-ph/9912508](#).
- [48] R. M. Ros, *Gravitational lenses in the classroom*, *Physics Education* **43**(5), 506 (2008).
- [49] J. Surdej et al., *The optimal gravitational lens telescope*, *The Astronomical Journal* **139**(5), 1935 (2010).
- [50] C. R. Keeton, *A Catalog of Mass Models for Gravitational Lensing*, arXiv (2001). [ArXiv: astro-ph/0102341](#).
- [51] E. L. Turner, J. P. Ostriker e I. Gott, J. R., *The statistics of gravitational lenses - The distributions of image angular separations and lens redshifts*, *The Astrophysical Journal* **284**, 1 (1984).
- [52] R. Kormann, P. Schneider e M. Bartelmann, *A gravitational lens model for B 1422 +*

- 231, *Astronomy & Astrophysics* **286**(2), 357 (1994). [ArXiv:astro-ph/9311011](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9311011).
- [53] T. Treu, *Strong Lensing by Galaxies*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **48**(1), 87 (2010). [ArXiv:1003.5567](https://arxiv.org/abs/1003.5567).
- [54] R. Gavazzi et al., *The Sloan Lens ACS Survey. IV. The Mass Density Profile of Early-Type Galaxies out to 100 Effective Radii*, *The Astrophysical Journal* **667**(1), 176 (2007). [ArXiv:astro-ph/0701589](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0701589).
- [55] A. S. Bolton et al., *The BOSS Emission-Line Lens Survey. II. Investigating Mass-density Profile Evolution in the SLACS+BELLS Strong Gravitational Lens Sample*, *The Astrophysical Journal* **819**(2), 126 (2016). [ArXiv:1508.02507](https://arxiv.org/abs/1508.02507).
- [56] C. Grillo, *On the Average Density Profile of Dark-matter Halos in the Inner Regions of Massive Early-type Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **747**(1), L15 (2012). [ArXiv:1202.3791](https://arxiv.org/abs/1202.3791).
- [57] G. van de Ven, R. Mandelbaum e C. R. Keeton, *Galaxy density profiles and shapes - I. Simulation pipeline for lensing by realistic galaxy models*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **398**(2), 607 (2009). [ArXiv:0808.2493](https://arxiv.org/abs/0808.2493).

Divulgação científica em astronomia para crianças no contexto pandêmico: uma proposta de disciplina eletiva para a licenciatura em pedagogia

Vitor Amorim, Giselli Belli, Emerson Izidoro e Rui Manoel de Bastos Vieira
Universidade Federal de São Paulo

Resumo

Este artigo descreve experiência desenvolvida no contexto de uma disciplina eletiva, Divulgação Científica em Astronomia para Crianças, oferecida virtualmente a estudantes de Pedagogia da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp) durante o segundo semestre de 2021, devido à pandemia de Covid-19. O curso abordou desde noções básicas de Astronomia até estratégias de produção de vídeos para divulgação científica, enfrentando desafios na transição da educação presencial para o ensino remoto. A metodologia didática incluiu a divisão da ementa da disciplina em três blocos, abordando temas essenciais para a Educação em Astronomia, e enfatizou a flexibilidade e resiliência necessárias no ambiente virtual. Os objetivos da disciplina, como oferecer uma formação teórico-prática, discutir temas relevantes para a Educação em Astronomia e estudar propostas para práticas de divulgação científica, foram alcançados. A abordagem colaborativa e as atividades práticas estimularam o pensamento crítico e científico dos estudantes, trazendo alguma contribuição para pensarem na Divulgação Científica como uma possibilidade didática dentro da educação científica. A experiência reforçou a importância da comunicação e da linguagem no processo educativo, mesmo à distância, e a necessidade de explorar ferramentas tecnológicas de maneira criativa e eficiente.

Abstract

This article describes an experience developed in the context of an elective course, Scientific Outreach in Astronomy for Children, offered virtually to Pedagogy students at the Federal University of São Paulo (Unifesp) during the second semester of 2021, due to the Covid-19 pandemic. The course covered basic Astronomy concepts to strategies for video production for scientific outreach, facing challenges in the transition from in-person to remote education. The didactic methodology included dividing the course syllabus into three blocks, addressing essential topics for Astronomy Education, and emphasized the flexibility and resilience required in the virtual environment. The course's objectives, such as providing theoretical and practical training, discussing relevant topics for Astronomy Education, and studying proposals for scientific outreach practices, were achieved. The collaborative approach and practical activities stimulated students' critical and scientific thinking, contributing to considering Scientific Outreach as a didactic possibility within science education. The experience reinforced the importance of communication and language in the educational process, even at a distance, and the need to explore technological tools in a creative and efficient manner.

Palavras-chave: educação científica, formação docente, produção audiovisual.

Keywords: scientific education, teacher training, audiovisual production.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43628](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43628)

1 Introdução

A formação inicial docente desempenha um papel crucial na autonomia profissional, especialmente quando se trata da abordagem de temas científicos, como Astronomia, nos Anos Iniciais do Ensino Fundamental e na Educação Infantil. A inclusão de conteúdos astronômicos no currí-

culo escolar já existe [1]. Mas, a falta de preparo durante a graduação contribui para a insegurança dos professores ao abordar esses temas. Cerqueira Jr. et al [2] destacam as dificuldades enfrentadas por docentes dos anos iniciais do Ensino Fundamental ao ensinar Astronomia. Essa falta de familiaridade com os conhecimentos científicos leva muitos professores a evitar esses assun-

tos em sala de aula. Essa insegurança, em grande parte, é resultado das lacunas em sua formação inicial. Segundo Bretones [3], é importante destacar que, embora alguns conceitos de Astronomia já façam parte do currículo da educação básica, a maioria dos docentes não recebeu uma formação adequada durante a graduação para ensinar esse conteúdo. Diversos autores (ver, por exemplo, Refs. [2–8]) destacam as dificuldades enfrentadas por esses professores ao abordar temas astronômicos. Isso leva muitos docentes a evitarem falar sobre esses assuntos com os estudantes, fugindo de conhecimentos científicos que não dominam. Essa insegurança, em grande parte, é resultado de lacunas na formação inicial.

Nesse sentido, é necessário investir em estratégias de formação continuada que capacitem os professores para a Educação em Astronomia. Isso inclui proporcionar recursos educacionais e materiais didáticos adequados, além de promover espaços e oportunidades de capacitação e troca de experiências entre os docentes. Dessa forma, os professores poderão adquirir maior segurança e desenvolver habilidades para abordar a Astronomia de maneira mais efetiva, despertando o interesse dos alunos e promovendo uma compreensão mais ampla do universo. Assim, a formação inicial de professores desempenha um papel fundamental de fornecer aos futuros educadores as ferramentas necessárias para desenvolverem, por si próprios, programas de estudo que servirão como base para o seu trabalho diário em sala de aula. Conforme enfatiza Nóvoa,

A formação deve estimular uma perspectiva crítico-reflexiva, que forneça aos professores os meios de um pensamento autônomo e que facilite as dinâmicas de autoformação participada. Estar em formação implica um investimento pessoal, um trabalho livre e criativo sobre os percursos e projetos próprios, com vistas à construção de uma identidade, que também é uma identidade profissional [9, p. 25].

Dessa forma, é essencial que os programas de formação inicial docente promovam uma abordagem reflexiva e crítica, permitindo que os futuros educadores desenvolvam habilidades de pensamento autônomo e construam uma identidade profissional sólida. Isso implica em capacitar os professores a serem protagonistas de sua própria formação, buscando constantemente o aprimora-

mento e a atualização de suas práticas pedagógicas. A formação inicial deve ir além da transmissão de conhecimentos e técnicas, proporcionando aos futuros professores espaços de reflexão e diálogo sobre a sua prática docente. Essa abordagem favorece o desenvolvimento de uma postura crítica, o aprimoramento das competências pedagógicas e a construção de uma identidade profissional que seja comprometida com a educação de qualidade. Portanto, os programas de formação inicial de professores devem buscar não apenas fornecer conhecimentos teóricos e práticos, mas também estimular a autonomia, a reflexão e a construção de uma identidade profissional. A formação docente deve constituir-se como um processo contínuo de aprendizagem e desenvolvimento, permitindo aos professores tornarem-se agentes de transformação na educação, capazes de oferecer uma educação significativa para seus alunos [8].

De acordo com Prado e Nardi [10], os cursos de Pedagogia frequentemente não dispõem de tempo suficiente para abordar, de forma abrangente, conteúdos científicos, como a astronomia, resultando em lacunas na formação dos docentes. Ao ensinar esses conceitos, os professores, muitas vezes, recorrem aos conhecimentos adquiridos durante sua própria formação no Ensino Fundamental, o que pode resultar em um ensino baseado em senso comum. Além disso, é importante promover uma reflexão sobre a importância do ensino de ciências, incluindo a Astronomia, nos anos iniciais do Ensino Fundamental e buscar estratégias de formação continuada que capacitem os professores nessa área. Isso contribuirá para que eles possam oferecer, aos alunos, uma educação científica de qualidade, despertando o interesse e a curiosidade pelas ciências, desde cedo. Portanto, é necessário repensar a formação dos professores dos anos iniciais, oferecendo suporte e recursos para aprimorar suas práticas pedagógicas na área das Ciências Naturais, incluindo a Astronomia. Somente assim será possível superar as lacunas existentes e proporcionar aos alunos uma educação científica mais significativa.

Este trabalho tem por finalidade relatar experiência desenvolvida em uma disciplina eletriva, intitulada Divulgação Científica em Astronomia para Crianças, oferecendo suporte e recursos para aprimorar práticas pedagógicas na área

das Ciências Naturais, especificamente em Astronomia, visando proporcionar uma educação científica mais significativa aos estudantes. Essa iniciativa foi direcionada aos estudantes do curso de Graduação em Pedagogia da Universidade Federal de São Paulo (EFLCH-Unifesp), realizada de forma virtual devido às circunstâncias impostas pela pandemia de Covid-19. Nesse texto, exploraremos a metodologia adotada nessa disciplina, destacando sua carga horária, os desafios enfrentados na transição para o ensino remoto, e os objetivos que nortearam cada etapa do curso. Ao mergulhar na estrutura do programa, abordaremos os temas essenciais que compuseram os blocos de estudo, desde as noções básicas de Astronomia até a aplicação prática por meio de experimentos e produção de vídeos.

2 Metodologia

Foi organizada uma disciplina (Unidade Curricular - UC) eletiva denominada Divulgação Científica em Astronomia para Crianças, ofertada aos estudantes do período noturno do curso de Graduação em Pedagogia da Escola de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade Federal de São Paulo (EFLCH-Unifesp). A disciplina teve uma carga horária de 75 horas e foi ministrada no segundo semestre de 2021, entre os dias 07 de outubro de 2021 e 10 de fevereiro de 2022. É importante destacar que, devido ao contexto pandémico imposto pela Covid-19, e ao consequente fechamento das atividades presenciais na universidade, todos os encontros foram conduzidos de forma virtual, utilizando a plataforma Google Meet. A transição do ambiente presencial para o virtual trouxe consigo desafios significativos, uma vez que o ensino remoto emergencial era uma novidade para todos os envolvidos.

A introdução do ensino remoto, como resposta à pandemia, levou-nos a repensar nossas abordagens de aprendizado e ensino. A tecnologia passou a desempenhar um papel ainda mais crucial em nossas vidas acadêmicas, exigindo que nos adaptássemos rapidamente a novas ferramentas e plataformas. Essa mudança também nos levou a refletir sobre a importância do contato humano no processo educativo e a encontrar maneiras de manter a colaboração e o engajamento, mesmo à

distância. Assim, ao considerar a mudança para o ensino remoto devido à pandemia, podemos afirmar que essa transição trouxe à tona uma série de reflexões sobre a flexibilidade e a resiliência necessárias para enfrentar desafios inesperados. Além disso, ela destacou a importância de explorar novas formas de aprendizado e ensino, aproveitando ao máximo as ferramentas tecnológicas disponíveis.

Entre os principais objetivos da UC destacaram-se:

- Oferecer às estudantes uma formação teórico-prática nas estruturas de Divulgação Científica em Astronomia, em suas diversas modalidades comunicativas.
- Discutir temas relevantes para a Educação em Astronomia na educação básica.
- Oferecer às estudantes noções básicas de Astronomia. Discutir as origens, implicações e impactos culturais da ciência.
- Estudar diferentes propostas que auxiliam no desenvolvimento de práticas de divulgação científica em Astronomia.

A UC foi dividida em três blocos: o primeiro bloco, voltado para noções básicas de Astronomia, apresentando os conceitos de Astronomia mais abordados nos Anos Iniciais do Ensino Fundamental, como os movimentos do céu e a Terra, o movimento aparente do Sol, as fases da Lua e eclipses; o segundo, voltado para noções básicas de Educação em Ciências e Divulgação Científica, apresentando conceitos como DC e o Ensino por investigação, diferença entre conceitos de divulgação, comunicação, difusão, disseminação e popularização, e espaços não formais para a difusão da astronomia; o último, destinado à aplicação prática, resultando num mecanismo de divulgação científica em Astronomia para crianças. Cada bloco foi composto por 4 aulas. Descrevemos brevemente a seguir a estrutura das atividades desenvolvidas na UC.

3 Resultados e discussões

Iniciamos a primeira aula da disciplina com uma apresentação da equipe e da proposta do

curso. Em seguida, realizamos uma roda de conversa com as estudantes, onde elas puderam compartilhar suas experiências e expectativas em relação à disciplina. Durante essa atividade, mapeamos as vivências das estudantes, com ênfase em experiências relacionadas à atuação na Educação, projetos de Divulgação Científica, tópicos de Astronomia e produção de vídeos. Além disso, foi importante identificar quais equipamentos as estudantes utilizariam para acompanhar a disciplina de forma remota. Essa abordagem inicial da disciplina permitiu estabelecer um diálogo colaborativo entre a equipe docente e as estudantes, promovendo um espaço de escuta e compartilhamento de experiências. Ao conhecer as vivências e expectativas das estudantes, foi possível direcionar as atividades e os conteúdos da disciplina de forma mais alinhada com seus interesses e necessidades. Assim, a primeira aula da disciplina foi um momento importante de aproximação, diálogo e planejamento conjunto, estabelecendo uma base sólida para o desenvolvimento da UC e promovendo uma experiência formativa enriquecedora para as estudantes.

3.1 Bloco I: noções básicas de astronomia

O bloco inicial (Tabela 1), voltado para noções básicas de Astronomia, corresponde da segunda até a quinta aula.

Tabela 1: Aulas do bloco I.

Aula	Tema
Aula 02	O céu e a Terra
Aula 03	O Sol
Aula 04	A Lua
Aula 05	Tópicos de Astronomia

Na segunda aula, abordamos o tema O céu e a Terra, explorando temas como o formato da Terra, a observação do céu e o movimento dos astros. Levando em consideração as discussões atuais sobre a esfericidade da Terra [11], julgamos essencial este ser o ponto de partida. Então, decidimos iniciar a aula com a apresentação dos quatro principais argumentos que comprovam a esfericidade do planeta e refutam a ideia de uma Terra plana. Esses argumentos incluem: (a) eclipses lunares, em que a sombra circular da Terra pro-

jetada na Lua indica a forma esférica, lembrando que a única forma geométrica para que tenhamos uma sombra circular em todas as perspectivas é a esfera; (b) a presença de constelações visíveis apenas em determinados hemisférios, destacando que algumas constelações são visíveis apenas do hemisfério Sul e outras apenas do hemisfério Norte, o que seria impossível se a Terra fosse plana; (c) a observação dos mastros dos navios, observando que quando um navio aproxima-se, no horizonte, vemos primeiro sua parte mais alta e, só depois, o vemos por inteiro; e, (d) o Experimento de Eratóstenes, afirmando que, se a Terra fosse plana, a sombra de uma vareta vertical, no mesmo dia e horário, seria a mesma em locais de latitude diferentes [12–14]. Durante essa aula, realizamos uma atividade prática utilizando bolinhas de isopor e tampinhas em forma de disco, juntamente com uma fonte de luz, para observar as formas das sombras desses objetos em diversos ângulos diferentes. Essa experiência proporcionou, aos estudantes, uma compreensão visual dos conceitos abordados, tornando o aprendizado mais concreto e significativo. A abordagem desse tema permite, aos estudantes, explorar a relação entre a Terra e o céu, compreendendo a esfericidade do planeta e sua influência na observação dos fenômenos celestes. Além disso, essa atividade prática estimula a curiosidade e o pensamento crítico, levando os estudantes a refletir sobre as evidências científicas que sustentam a esfericidade da Terra.

Durante a aula, sobre as observações do céu, abordamos as influências culturais presentes até os dias atuais. Destacamos, por exemplo, a origem dos sete dias da semana a partir dos cinco planetas visíveis (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno), o Sol e a Lua [15]. Essas observações são importantes para determinar a melhor época para atividades como plantio, colheita e caça, além de prever as variações de temperatura ao longo do ano, servindo como medida da passagem do tempo e contribuindo para a construção dos primeiros calendários [15]. Também realizamos uma atividade sobre as constelações, discutindo suas origens, definições e impactos culturais e sociais, como o uso dos signos zodiacais. É importante ressaltar que os agrupamentos de estrelas em uma constelação são aparentes, e as distâncias entre as estrelas de uma mesma constelação podem ser muito grandes [16]. Para isso,



Figura 1: Aparato das constelações.



Figura 2: Utilização do software Stellarium.

utilizamos um aparato onde é possível visualizar as diferentes distâncias das estrelas em uma constelação (Figura 1).

Outro tema abordado foi o movimento dos astros, em que exploramos o motivo de termos a sensação de que a Terra está em repouso, enquanto os demais astros movem-se em relação a ela. Essa percepção ocorre porque nosso sistema de referência é baseado em observadores na Terra, que consideram o planeta como ponto fixo, enquanto os outros astros se movem em relação a ele [13]. Utilizamos o software Stellarium [17], possibilitando a visualização e compreensão do movimento aparente da esfera celeste em diferentes localidades da Terra. A abordagem desses temas proporcionou, aos estudantes, uma compreensão mais ampla das influências culturais nas observações astronômicas, destacando a importância desses conhecimentos para diferentes sociedades ao longo da história. Além disso, a utilização do software Stellarium (Figura 2) permitiu uma experiência interativa e visualmente estimulante, auxiliando no entendimento dos movimentos dos astros e na contextualização das observações astronômicas. Assim, a segunda aula foi um momento de exploração e discussão fundamentais para o entendimento do formato da Terra e interações entre a Astronomia, a cultura e a percepção humana, ampliando o entendimento sobre o céu e sua relação com os fenômenos astronômicos. Ao reconhecer as influências culturais e compreender os movimentos dos astros, os estudantes são incentivados a desenvolver um olhar crítico e reflexivo sobre o conhecimento científico, reconhecendo a importância de contextos culturais na interpretação dos fenômenos astronômicos. Ao utilizar atividades práticas buscamos promover uma compreensão do tema, contribuindo para a forma-



Figura 3: Nascer do Sol no Stellarium.

ção dos estudantes como divulgadores científicos em Astronomia.

Durante a terceira aula, abordamos o tema O Sol e exploramos diferentes aspectos relacionados ao movimento aparente dessa estrela, suas variações ao longo do ano, estações do ano e sua influência na origem dos calendários. Iniciamos as discussões questionando como temos a percepção de que o Sol gira ao redor da Terra e se esse movimento aparente sofre mudanças sazonais. Expliquemos que essa percepção ocorre devido à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano que contém a elipse de translação [12, 13]. Porém, ressaltamos que, embora a órbita da Terra seja uma elipse, sua baixa excentricidade faz com que se aproxime de um círculo, o que não influencia nas estações do ano [18, 19]. Utilizamos o software Stellarium [17] para ilustrar como a posição do nascer do sol varia ao longo dos dias do ano (Figura 3). Destacamos que o Sol nasce exatamente no ponto cardeal leste e se põe no ponto cardeal oeste somente nos dias de equinócio, enquanto nos demais dias do ano ele nasce em pontos mais ao norte ou ao sul do leste, dependendo da estação [20].

Além disso, utilizamos uma bola de isopor fixada em um espeto e uma fonte luminosa para demonstrar como as estações do ano ocorrem,



Figura 4: Estações do ano com uma bola de isopor.

devido à inclinação do eixo de rotação da Terra (Figura 4). Essa atividade prática permitiu, aos estudantes, visualizarem, de forma concreta, a relação entre a inclinação do eixo da Terra e a incidência da luz solar em diferentes regiões ao longo do ano. Essa visualização ajudou-os a compreenderem como as estações do ano são influenciadas pela inclinação do eixo de rotação da Terra durante sua translação ao redor do Sol.

Em relação às estações do ano, também discutimos o texto Um episódio na vida de Joãozinho da Maré, de Rodolfo Caniato [21]. A partir dessa história, os estudantes puderam problematizar a forma equivocada como as estações do ano foram ensinadas pela professora, personagem do texto, baseada na distância da Terra ao Sol. Ou seja, quanto maior a proximidade com o Sol seria verão, e no inverno a Terra estaria afastada do Sol, e o Joãozinho, um estudante, argumenta que, se isso fosse verdade, teríamos estações iguais nos dois hemisférios do planeta, e não distintas, como realmente ocorre. Isso aponta que as estações do ano são determinadas pela inclinação do eixo da Terra e não pela proximidade ou afastamento em relação ao Sol. Essa reflexão permitiu aos estudantes compreenderem a importância de uma abordagem correta sobre as estações do ano no contexto educacional.

Refletimos, também, sobre as representações das estações do ano na mídia, como filmes e decorações natalinas, que são tipicamente retratados com elementos que fazem referência ao inverno, mesmo ocorrendo no verão no hemisfério Sul, em dezembro. Essas reflexões destacaram a importância de compreendermos as estações do ano de forma contextualizada, considerando as diferenças hemisféricas e as características locais. Dessa forma, a terceira aula proporcionou aos estudan-

tes uma compreensão mais profunda sobre o movimento do Sol, as estações do ano e as representações culturais a elas associadas. Esse momento permitiu aos estudantes compreenderem melhor o movimento aparente do Sol, bem como as variações sazonais relacionadas a ele. Além disso, exploramos a importância do Sol na definição dos calendários, já que sua posição no céu é utilizada como referência para marcar dias, meses e anos. Ao compreender esses aspectos, os estudantes são capazes de relacionar o movimento do Sol com fenômenos naturais, como as estações do ano, e compreender a influência desses movimentos em diferentes latitudes. Essa compreensão amplia o conhecimento dos estudantes sobre a Astronomia e sua relação com a Terra, permitindo uma visão mais integrada e contextualizada dos fenômenos celestes. Dessa forma, a abordagem do tema O Sol, na terceira aula, contribuiu para o desenvolvimento do pensamento crítico e científico dos estudantes, permitindo-os questionar e desmistificar concepções equivocadas sobre o tema.

A quarta aula teve como tema A Lua e abordou assuntos como as fases da Lua, eclipses e marés. Iniciamos com a exibição de um episódio do desenho animado Show da Luna, intitulado Quatro Luas para Luna, da TV Brasil e TV PimGuim [22]. Nesse episódio, de forma lúdica e acessível às crianças, é abordado o tema das fases da Lua por meio de um artefato inspirado na caixa de fases da Lua apresentada por Saraiva et al [23]. Essa abordagem proporcionou uma compreensão mais clara e divertida sobre o fenômeno das fases da Lua. Para facilitar a compreensão das fases da Lua, em um ambiente virtual, utilizamos uma fonte luminosa fixa na parede juntamente com uma câmera, ambos simulando o Sol. Outra câmera foi fixada e tinha a função de girar, permitindo visualizar todo o ambiente, esta câmera tem como função representar o observador na Terra (Figura 5). Utilizando uma bolinha de isopor para representar a Lua, possibilitando visualizar as fases da Lua como um fenômeno decorrente da combinação dos movimentos do sistema Sol-Terra-Lua, pudemos observar as diferentes fases da Lua e sua relação com o período do dia em que ela pode ser vista. Foi abordado o movimento síncrono da Lua, em que ela realiza um movimento síncrono de rotação e translação, ou seja, com a mesma duração, resultando



Figura 5: Fases da Lua em uma bola de isopor por uma câmera rotacional.

na mesma face sempre visível da Terra [12, 13].

Essa característica levantou reflexões sobre o lado oculto da Lua, muitas vezes erroneamente chamado de lado escuro, e como isso é retratado em diferentes contextos midiáticos. Também discutimos teorias sobre a formação da Lua e a corrida espacial que possibilitou a chegada do homem ao satélite natural. Além disso, exploramos as situações especiais em que a Terra, a Lua e o Sol se alinham no espaço. Dessa maneira, a Lua ou o Sol podem não ser vistos (total ou parcialmente) por nós, que estamos na Terra, fenômenos que designamos como eclipses solares e lunares [12, 13, 24]. Para compreender melhor esses fenômenos, utilizamos o mesmo procedimento adotado para as fases da Lua, enfatizando o movimento de translação da Terra ao redor do Sol e a inclinação do plano orbital da Lua em relação ao plano orbital da Terra.

As marés foram abordadas por um ponto de vista observacional, como sendo mudanças no nível do mar, devido à invasão ou ao vazamento, e que estas ocorrem principalmente em função da força gravitacional que o Sol e a Lua exercem sobre a Terra, sendo a influência da Lua a mais importante [13]. Foi destacado que quando a Lua e o Sol estão praticamente alinhados com a Terra (próximo da Lua Cheia ou Lua Nova) as marés da Lua e do Sol somam-se resultando grandes variações de maré, sendo as chamadas marés de sínfase (ou marés de alinhamento, ou marés de águas-vivas), e quando o Sol e a Lua não estão alinhados com a Terra (próximo da Lua Quarto-Crescente ou Lua Quarto-Minguante), resulta em pequenas variações de marés, denominadas marés de quadratura (ou marés de águas-mortas) [13]. Além disso, essa atividade permitiu-nos refletir sobre

a importância das marés para diversos aspectos da vida na Terra, como a navegação marítima, a pesca e o ecossistema costeiro. Essa aula proporcionou aos estudantes a possibilidade de uma compreensão mais ampla sobre as relações entre o Sol, a Lua e a Terra, especificamente a ocorrência das fases da Lua, eclipses e marés. Por meio de discussões, atividades práticas e recursos audiovisuais, os estudantes puderam visualizar e relacionar esses fenômenos astronômicos, de forma mais concreta e significativa.

A quinta aula abordou outros tópicos de Astronomia, incluindo elementos da astrofísica, evolução estelar e buracos negros. Diferente das aulas anteriores, as discussões desta aula foram guiadas pelas dúvidas e curiosidades das estudantes, não seguindo uma ordem pré-determinada. Isso permitiu um diálogo aberto e a exploração de diversos temas relacionados à Astronomia. Essa abordagem mais flexível possibilitou que as estudantes aprofundassem seus interesses específicos e participassem ativamente na construção do conhecimento. Além disso, ao permitir um ambiente de discussão aberto, houve espaço para o surgimento de questionamentos instigantes e reflexões mais profundas sobre os temas abordados. Ao permitir que os estudantes conduzissem a direção da aula, foi possível criar um ambiente de aprendizagem mais dinâmico e envolvente, onde o interesse e a motivação foram estimulados.

3.2 Bloco II: noções básicas de educação e divulgação científica

O segundo bloco (Tabela 2), voltado para noções básicas de Educação em Ciências e Divulgação Científica, corresponde da sétima até a nona aula e, ainda, a décima segunda aula.

Na sétima aula, intitulada Elementos da Educação em Ciências para a DC, exploramos a metodologia de Ensino por investigação. Ao abordar a Educação em Ciências para os Anos Iniciais do Ensino Fundamental, apresentamos as ideias de Carvalho [25] que fundamentam propostas de atividades relacionadas ao conhecimento físico. Durante a aula, analisamos as bases teóricas que embasam a atividade de sombras e discutimos as respostas dos alunos ao resolverem o problema proposto, promovendo uma reflexão sobre suas ações e buscando explicações causais para o fenô-

Tabela 2: Aulas do bloco II.

Aula	Tema
Aula 07	Elementos da Educação em Ciências para a DC
Aula 08	Conceitos de Divulgação Científica
Aula 09	Extensão e Invasão Cultural
Aula 12	Universidade e espaços não formais para a difusão da Astronomia

meno estudado. Além disso, com base nas contribuições de Santos [26], apresentamos diferentes significados da educação científica, entendendo-a como um processo complexo de alfabetização e letramento científico. A partir desse contexto, discutimos o conceito de letramento científico como uma prática social. Essas reflexões visaram proporcionar uma visão mais abrangente e crítica sobre o papel da educação científica na formação das crianças.

Na oitava aula, intitulada Conceitos de Divulgação Científica, exploramos as diferentes nomenclaturas utilizadas para se referir à prática, como comunicação, divulgação, difusão, disseminação e popularização. Iniciamos as discussões abordando o papel social das atividades de divulgação científica, embasados nas reflexões de Albagli [27]. Analisamos seus antecedentes históricos, conceitos fundamentais, motivações contemporâneas, meios e instrumentos utilizados. Em seguida, com base nas contribuições de Lima e Giordan [28], abordamos as principais visões empregadas para compreender a DC, tanto como uma reformulação discursiva, da ciência, quanto como um gênero discursivo. Ressaltamos que a DC pode ser compreendida como uma prática objetivada por meio de atividades desenvolvidas em diferentes contextos. Essas reflexões nos permitem ter uma visão mais ampla e crítica sobre a natureza e as características da divulgação científica.

As discussões da nona aula, intitulada Extensão e Invasão Cultural', foram fundamentadas no capítulo de mesmo nome do livro Extensão ou Comunicação? escrito por Paulo Freire [29]. Iniciamos com a reflexão do autor sobre a reforma

agrária, o papel do agrônomo educador e a transformação cultural. Freire utiliza a metáfora da invasão cultural, onde o agrônomo é o invasor e o homem do campo é o invadido, na concepção de sua prática laboral. Essa metáfora é trazida para o contexto da Divulgação Científica, destacando as semelhanças entre o divulgador científico e o agrônomo invasor. Essa analogia convida-nos a refletir sobre as relações de poder e dominação presentes na prática da divulgação científica, evidenciando a importância de uma abordagem mais democrática e participativa na comunicação da ciência.

As discussões da décima segunda aula, intitulada Universidade e Espaços não Formais para a Difusão da Astronomia, abordaram a presença da Astronomia nos contextos da educação formal, informal, não formal e na DC. Iniciamos com a apresentação da classificação proposta por Langhi e Nardi [30], que engloba instituições brasileiras que se empenham com a abordagem pública da astronomia. Essa classificação leva em consideração os objetivos dessas instituições, que podem estar relacionados à educação formal, informal, não formal e à DC da astronomia. Por meio dessa abordagem, é possível compreender a diversidade de espaços e estratégias utilizados para difundir o conhecimento astronômico e despertar o interesse do público em relação a essa ciência.

3.3 Bloco III: experimento e vídeo

O último bloco (Tabela 3), destinado à aplicação prática, resultando em um mecanismo de divulgação científica em Astronomia para crianças, corresponde a sexta, décima, décima primeira e a décima terceira aula.

Tabela 3: Aulas do bloco III.

Aula	Tema
Aula 06	Tema e ideia de Produção
Aula 10	Estratégias de Produção de Artefato/Atividade
Aula 11	Estratégias de Produção de Vídeos
Aula 13	Feedback e Discussão dos Trabalhos

Durante a sexta aula, intitulada Tema e ideia de Produção, realizamos uma roda de conversa

com as estudantes, com o objetivo de explorar e orientar as ideias de aplicação prática para a criação de um mecanismo de divulgação científica em Astronomia voltado para crianças. Nessa discussão colaborativa todas as participantes tiveram oportunidade de compartilhar vantagens e desvantagens de cada ideia, promovendo uma troca de conhecimentos e sugestões entre elas. Essa abordagem colaborativa, e reflexiva, permitiu o aprimoramento das propostas e uma visão mais abrangente sobre as possibilidades de divulgação científica para o público infantil.

Durante a décima aula, intitulada Estratégias de Produção de Artefato/Atividade, realizamos uma roda de conversa para acompanhar o progresso dos projetos em andamento. Nesse momento, os participantes tiveram a oportunidade de esclarecer dúvidas conceituais, compartilhar dificuldades encontradas e solicitar sugestões de como superá-las. Essa troca de informações e ideias proporcionou um ambiente colaborativo, onde foi possível discutir estratégias e encontrar soluções criativas para a produção dos artefatos ou atividades propostas.

Na décima primeira aula, abordamos o tema Estratégias de Produção de Vídeos, com base nas orientações de Oechsler, Fontes e Borba [31]. Nesse encontro, foram compartilhadas ferramentas e estratégias que poderiam ser aplicadas na produção de um vídeo. Orientamos as participantes a posicionar-se adequadamente diante da câmera, buscando uma proporção semelhante à de um apresentador de jornal, garantindo que seus gestos e movimentos estivessem dentro do quadro de visualização. Para destacar detalhes importantes de artefatos ou atividades, recomendamos o uso de cortes e planos mais próximos, que permitissem uma melhor visualização. Caso fossem necessárias montagens ou procedimentos longos, sugerimos a utilização de recursos de aceleração para evitar vídeos longos e monótonos. Além disso, incentivamos a inserção de efeitos visuais, memes, músicas de fundo e outros elementos que pudessem tornar o vídeo mais descontraído, evitando sobrecarregar o espectador com informações e tornando a experiência mais divertida e envolvente.

Durante a décima terceira aula, intitulada *Feedback* e Discussão dos Trabalhos, as participantes tiveram a oportunidade de assistir aos vídeos

de divulgação científica em Astronomia para crianças produzidos pelas colegas. Durante essa sessão, todos os participantes forneceram *feedback*, destacando os aspectos mais positivos e prazerosos da produção, bem como os desafios enfrentados ao longo do processo. Essa troca de experiências e percepções permitiu um aprendizado colaborativo e enriquecedor para todos os envolvidos.

4 Considerações finais

A metodologia adotada para essa disciplina eletriva de Divulgação Científica em Astronomia para Crianças, ministrada de forma remota, devido à pandemia, apresentou desafios significativos. A transição do ensino presencial para o virtual exigiu flexibilidade e resiliência, mas também proporcionou reflexões valiosas sobre a importância do contato humano no processo educativo. A adaptação às novas ferramentas tecnológicas destacou a necessidade de explorar novas formas de aprendizado e ensino. Os objetivos da disciplina foram alcançados, oferecendo uma formação teórico-prática nas estruturas de divulgação científica em Astronomia, discutindo temas relevantes para a Educação em Astronomia e estudando propostas para práticas de divulgação científica. O curso foi dividido em blocos, cobrindo desde noções básicas de Astronomia até estratégias de produção de vídeos para divulgação científica. As aulas foram interativas, incluindo atividades práticas, discussões e rodas de conversa. A abordagem colaborativa permitiu uma experiência enriquecedora para os estudantes, estimulando o pensamento crítico e científico. Dessa forma, o curso não apenas proporcionou conhecimento sobre Astronomia, mas também desenvolveu habilidades práticas e reflexivas nos participantes.

Ao longo do desenvolvimento da disciplina eletriva foi possível explorar e refletir sobre diferentes aspectos relacionados ao ensino, aprendizado e prática de divulgação científica em Astronomia. A transição para o ensino remoto, devido à pandemia de Covid-19, trouxe desafios significativos, mas também oportunidades de repensar abordagens e explorar novas formas de ensino e aprendizado. Destacamos a importância do diálogo colaborativo entre a equipe docente e as estudantes,

criando um ambiente de escuta e compartilhamento de experiências. A roda de conversa inicial permitiu mapear as vivências e expectativas das estudantes, direcionando as atividades de forma mais alinhada com seus interesses e necessidades.

No bloco I, voltado para noções básicas de Astronomia, exploramos temas como o movimento dos astros, fases da Lua, movimento aparente do Sol e influências culturais nas observações astronômicas. As atividades práticas, como a utilização de bolinhas de isopor para representar as sombras da Terra e a simulação do movimento da Lua, contribuíram para uma compreensão mais concreta e visual dos conceitos. No bloco II foram abordadas noções básicas de Educação em Ciências e Divulgação Científica, discutindo o ensino por investigação, conceitos de divulgação científica e reflexões sobre a invasão cultural na prática de divulgação. A flexibilidade nas aulas permitiu uma abordagem mais aberta, possibilitando que as estudantes aprofundassem seus interesses específicos e participassem ativamente na construção do conhecimento. No bloco III, dedicado à aplicação prática, as estudantes desenvolveram projetos de divulgação científica em Astronomia para crianças. A discussão sobre estratégias de produção de artefatos, atividades e vídeos permitiu explorar diferentes formas de comunicar conceitos astronômicos de maneira acessível e envolvente para o público infantil. O *feedback* e a discussão dos trabalhos proporcionaram oportunidades de aprendizado mútuo e aprimoramento dos projetos.

Em meio aos desafios do ensino remoto, a disciplina buscou estimular a flexibilidade, a resiliência e a busca por novas formas de aprendizado e ensino. A experiência reforçou a importância do contato humano no processo educativo, mesmo à distância, e destacou a necessidade de explorar ferramentas tecnológicas de maneira criativa e eficiente. Diante do exposto, consideramos que a disciplina cumpriu seus objetivos ao proporcionar uma formação teórico-prática em divulgação científica em Astronomia para estudantes do curso de Graduação em Pedagogia. A abordagem colaborativa, as atividades práticas e a aplicação prática dos conhecimentos contribuíram para o desenvolvimento do pensamento crítico, científico e criativo das estudantes, fornecendo elementos teóricos e práticos para atuarem como divulgadoras

científicas em Astronomia no contexto educacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio com bolsas.

Sobre os autores

Vitor Amorim (vitor.amorim@unifesp.br) é Mestre em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), e Licenciado em Ciências da Natureza pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente é Professor de Ensino Fundamental e Médio do Governo do Estado de São Paulo.

Giselli Belli (giselli.belli@unifesp.br) é Mestre em Educação pela Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), Licencianda em Pedagogia na Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), Licenciada em Química pela Universidade Cruzeiro do Sul, e Tecnóloga em Polímeros pelo Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (Fatec). Atualmente é auxiliar técnico na Secretaria Municipal de Educação de São Paulo.

Emerson Izidoro (emerson.izidoro@unifesp.br) é Doutor em Educação para a Ciência pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Mestre em Ensino de Ciências pela Universidade de São Paulo (USP), e Licenciado em Física e em Ciências da Natureza também pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Educação da Escola de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp).

Rui Manoel de Bastos Vieira (rui.vieira@unifesp.br) é Doutor em Ensino de Ciências pela Universidade de São Paulo (USP), Mestre em Ensino de Ciências pela Universidade de São Paulo (USP), e Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Ciências Exatas e da

Terra do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo.

Referências

- [1] Brasil, *Base Nacional Comum Curricular* (MEC, Brasília, 2017).
- [2] W. Cerqueira Jr. et al., *Confiança Demonstrada por Estudantes de Pedagogia sobre o Ensino de Astronomia para as Séries Iniciais do Ensino Fundamental*, *Rev. Latinoam. Educ. Astron.* (20), 115 (2015).
- [3] P. Bretones, *Disciplinas introdutórias e Astronomia nos cursos superiores do Brasil*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1999).
- [4] R. Langhi e R. Nardi, *Dificuldades interpretadas nos discursos de professores dos anos iniciais do ensino fundamental em relação ao ensino da Astronomia*, *Rev. Latinoam. Educ. Astron.* (2), 75 (2005).
- [5] C. Leite e Y. Hosoume, *Os professores de ciências e suas formas de pensar a astronomia*, *Rev. Latinoam. Educ. Astron.* (4), 47 (2007).
- [6] C. Leite e Y. Hosoume, *Explorando a dimensão espacial na pesquisa em ensino de astronomia*, *Rev. Electrón. Enseñ. Cienc.* 8(3), 797 (2009).
- [7] S. E. M. Gonzatti et al., *Ensino de Astronomia: cenários da prática docente no Ensino Fundamental*, *Rev. Latinoam. Educ. Astron.* (16), 27 (2013).
- [8] V. Amorim, *Educação em astronomia para pedagogia no contexto pandêmico: divulgação científica, formação docente e produção audiovisual*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo (2023).
- [9] A. Nóvoa, *Os professores e sua formação* (Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1992).
- [10] A. F. Prado e R. Nardi, *Formação de professores dos anos iniciais e saberes docentes mobilizados durante um curso de formação em Astronomia*, *Rev. Latinoam. Educ. Astron.* (29), 103 (2020).
- [11] C. S. Bonfim e P. M. P. Garcia, *Investigando a “Terra plana” no YouTube: contribuições para o ensino de Ciências*, *Rev. Ensino Ciênc. Mat.* 12(3) (2021).
- [12] R. Boczek, *Astronomia Clássica*, in *Astronomia: uma visão geral do universo*, editado por Friaça (EdUSP, São Paulo, 2000), p. 35.
- [13] J. E. Horvath, *O ABCD da Astronomia e Astrofísica* (Livraria da Física, São Paulo, 2008).
- [14] F. L. Silveira, *Sobre a Forma da Terra*, *Fis. Escola* 15(2), 4 (2017).
- [15] D. E. Duncan, *Calendário: a epopeia da humanidade para determinar um ano verdadeiro e exato* (Ediouro, Rio de Janeiro, 1999).
- [16] M. D. Longhini, *Será o Cruzeiro do Sul uma cruz? Um novo olhar sobre as constelações e seu significado*, *Fis. Escola* 10(1), 26 (2009).
- [17] Stellarium, *Stellarium Developers* (2021), version 0.21.2.
- [18] S. Canalle, *O Problema do Ensino da Órbita da Terra*, *Fis. Escola* 4(2), 12 (2003).
- [19] W. S. Dias e L. P. Piassi, *Por que a variação da distância Terra-Sol não explica as estações do ano?*, *Rev. Bras. Ensino Fís.* 29(3), 325 (2007).
- [20] P. Bedaque e P. S. Bretones, *Posição do nascer do Sol no horizonte*, *Fis. Escola* 14(2), 31 (2016).
- [21] R. Caniato, *Projeto de ciências integrada: textos e atividades* (Papiro, Campinas, 1987), 3 ed.
- [22] S. da Luna, *Quatro Luas para Luna* (2016), criação e direção de C. Ca-tunda e K. Mistrorigo, (TV Brasil, TV Pinguim). Disponível em [\[https://youtu.be/e7SF0opk274\]](https://youtu.be/e7SF0opk274) [Accessed: (march18, 2022)].

- [23] M. F. O. Saraiva et al., *As fases da Lua numa caixa de papelão*, *Rev. Latinoam. Educ. Astron.* (4), 9 (2007).
- [24] F. P. Lima e J. F. V. Rocha, *Eclipses Solares e Lunares*, *Fis. Escola* 5(1), 22 (2004).
- [25] A. M. P. Carvalho, *Ciências no ensino fundamental*, *Cadernos de Pesquisa* (101), 152 (1997).
- [26] W. L. P. Santos, *Educação científica na perspectiva de letramento como prática social: funções, princípios e desafios*, *Rev. Bras. Educ.* 12(36), 474 (2007).
- [27] S. Albagli, *Divulgação científica: informação científica para cidadania*, *Ciênc. Inf.* 25(3) (1996).
- [28] G. S. Lima e M. Giordan, *Da reformulação discursiva a uma práxis da cultura científica: reflexões sobre a divulgação científica*, *Hist. Cienc. Saúde-Manguinhos* 28(2), 375 (2021).
- [29] P. Freire, *Extensão ou comunicação?* (Paz e Terra, São Paulo, 2011), 15 ed.
- [30] R. Langhi e R. Nardi, *Ensino da astronomia no Brasil: educação formal, informal, não formal e divulgação científica*, *Rev. Bras. Ensino Fís.* 31(4), 4402 (2009).
- [31] V. Oechsler, B. C. Fontes e M. C. Borba, *Etapas da produção de vídeos por alunos da educação básica: uma experiência na aula de matemática*, *Revista Brasileira de Educação Básica* 2(2) (2017).

O grande debate sobre a estrutura do Universo

Júlio C. Fabris¹ e Felipe T. Falciano²

¹Universidade Federal do Espírito Santo

²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

Em 1920, a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos organizou um debate entre Heber Curtis e Halow Shapley sobre a escala do Universo. Havia várias questões em jogo, mas sobressaem-se dois assuntos centrais: o tamanho da Via Láctea e a possibilidade das nebulosas espirais serem ou não galáxias externas à Via Láctea. Este episódio ficou conhecido como o grande debate e foi registrado em duas publicações em 1921 no Bulletin of the National Research Council. Além de sua importância histórica, o grande debate mostra os detalhes da construção do nosso conhecimento sobre o Universo.

Abstract

In 1920, the National Academy of Sciences organized a debate between Heber Curtis and Halow Shapley on the scale of the Universe. There were several issues at stake, but two central issues stood out: the size of the Milky Way and whether or not the spiral nebulae were galaxies outside the Milky Way. This episode became known as the great debate and was recorded in two publications in 1921 in the Bulletin of the National Research Council. In addition to its historical importance, the great debate shows the details of the construction of our knowledge of the Universe.

Palavras-chave: galáxia, cosmologia, grande debate, universo-ilhas.

Keywords: galaxy, cosmology, great debate, island universes.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43798](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43798)

1 Introdução

No início do século 20, os métodos observacionais recentemente desenvolvidos, como a relação entre classe espectral e magnitude absoluta das estrelas por Ejnar Hertzsprung e independentemente por Henry Russell, ou a relação período-luminosidade de estrelas variáveis por Henrietta Leavitt, expandiram de forma significativa o alcance das medidas de distância dos objetos astronômicos. Nessa época, a astronomia dedicava-se a questões basilares como a classificação dos objetos observados, suas formas e suas distâncias.

Da perspectiva de um pesquisador do século 21, é incrível o quanto aprendemos sobre o universo em apenas um século. Hoje em dia, sabemos que o universo está em expansão a pelo menos 13,7 bilhões de anos a partir de um estado muito denso e com altas temperaturas (altas energias). Gradualmente as pequenas perturbações de matéria e energia aglutinaram-se formando as primeiras estruturas e posteriormente condensando-se e for-

mando as estruturas que observamos: estrelas, nebulosas, galáxias, aglomerados de galáxias, filamentos, etc.

O universo observável estende-se por distâncias da ordem de 14 bilhões de parsec (1 parsec \sim 3,26 anos-luz ou $\sim 3,1 \times 10^{13}$ km) com uma quantidade enorme de galáxias e estrelas. Há ainda questões fundamentais a serem esclarecidas, como a natureza da energia e matéria escuras. Contudo, o nosso conhecimento sobre o universo é sólido o suficiente para a comunidade científica acordar na existência de um modelo padrão da cosmologia.

Nas primeiras décadas do século 20, o cenário era diferente. Debatia-se sobre como as estruturas astronômicas organizavam-se pelo universo. Estimava-se que a Via Láctea deveria ser, com boa probabilidade, uma galáxia espiral, mas a localização do nosso sistema solar, se perto ou afastado do centro da galáxia, era motivo de controvérsia entre os astrônomos da época. Foi neste contexto que ocorreu o grande debate [1].

Em 26 de Abril de 1920, a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos organizou o encontro anual na Smithsonian Institution em Washington D.C. O então secretário da academia, Charles G. Abbot, aceitou a sugestão de G. E. Hale em promover uma Hale Lecture, financiada pelo (*memorial fund*) fundo de caridade em homenagem a seu pai, William Ellery Hale.

A proposta era organizar um debate em uma das noites do evento. Aventou-se a possibilidade do tema ser a recente teoria da relatividade geral, mas devido à diversidade do público e a tecnicidade do assunto, Abbot optou pelo o outro assunto proposto, a saber, a escala do Universo. Os dois palestrantes convidados foram Harlow Shapley e Heber Curtis. Este encontro entre Shapley e Curtis ficou conhecido como o Grande Debate [2–5].

É interessante observar que a importância deste evento só ficou evidente muito tempo depois. O próprio Shapley comenta, em suas memórias [6], ter se surpreendido quando viu pela primeira vez a referência a este evento como algo histórico. Isto é compreensível já que questões históricas só podem ser propriamente entendidas com o passar do tempo e o necessário distanciamento para a análise dos acontecimentos.

Há dois assuntos centrais no grande debate. Durante sua apresentação, Shapley, fiel ao título do debate, desenvolveu de forma abrangente os motivos que o levaram a estimar o tamanho da Via Láctea com valor maior que outras estimativas da época. Por outro lado, Curtis, que trabalhava já alguns anos com nebulosas espirais, dedicou substancialmente sua apresentação a justificar a proposta do universo insular.

Curtis pleitava que as nebulosas espirais eram galáxias como a Via Láctea. Elas seriam externas e da mesma ordem de tamanho que a Via Láctea. Nesta visão, as galáxias estariam distribuídas como ilhas no universo.

Não é a primeira vez que esta ideia se apresenta. Immanuel Kant, em seus escritos científicos [7] propõe que o sistema solar tivesse sido formado pela condensação de uma nebulosa. O desdobramento de seu raciocínio foi a formulação de universos-ilha que é uma noção próxima ao que entendemos hoje por galáxias (evidentemente sem considerar a matéria escura). Contudo, uma diferença importante deve ser salien-

tada. Kant elenca este cenário baseado no seu desenvolvimento metafísico e não apresenta nenhuma base empírica. Sua proposta deve ser entendida apenas como uma hipótese, enquanto o debate entre Curtis e Shapley substancia-se em observações astronômicas.

Shapley questionava o conceito de universos-ilhas devido as escalas de distância que inviabilizariam este cenário.

Além da diferença na interpretação do tema do debate, a abordagem dos dois palestrantes também foi bem distinta. A apresentação de Curtis foi mais técnica e detalhada. Ademais, apesar do nome, o encontro não foi propriamente um debate mas duas apresentações sobre questões relacionadas.

Devido a todos esses fatores, após o episódio, ambos pesquisadores concordaram em colocar por escrito seus argumentos, os quais foram então publicados em 1921 no Bulletin of the National Research Council [1].

Na preparação que antecedeu a Hale Lectures, Shapley e Curtis fizeram suas apresentações de forma independente. Porém, para a publicação escrita, os autores trocaram correspondência ao preparar seus artigos com o intuito de cada um ter a oportunidade de considerar os argumentos e o ponto de vista do outro. O resultado são os dois textos referidos como o grande debate e traduzidos a seguir desta nota introdutória.

Ao ler os dois textos vemos que Shapley e Curtis discordam em vários pontos. Virginia [4] coleciona 14 tópicos e aponta de maneira sucinta sua interpretação de quem estava mais próximo do que hoje entendemos como correto em cada um dos pontos. Shapley, por exemplo, um especialista em aglomerados globulares, argumentou de maneira correta que as estrelas F, G e K identificadas em aglomerados globulares eram gigantes como as estrelas F-K locais.

Um outro ponto muito importantes defendido por Shapley foi a utilização da relação entre período e luminosidade das variáveis Cefeidas como indicadores de distância confiáveis. De fato, as Cefeidas são hoje em dia um dos degraus sólidos na escala de medida de distância em cosmologia. Porém, para fazer justiça, devemos notar que Curtis não se opõe a possibilidade de usar as Cefeidas como indicadores de distância. Seu argumento era que, dada as incertezas a época,

ainda era cedo para usá-las como base de argumentação para outras análises; ele defendia que mais dados eram necessários para validação de tal técnica.

O argumento de Shapley contra o cenário de universo insular advinha das dificuldades que certas observações impunham caso a Via Láctea tivesse o tamanho por ele defendido. Shapley estimou que a Via Láctea tivesse 300 mil anos-luz (1 parsec \sim 3,26 anos-luz), um valor 10 vezes maior do que outras estimativas da época, as quais eram usadas por Curtis. Apesar de ambos estarem com estimativas imprecisas, Shapley trouxe à tona a ideia de que a nossa galáxia deveria ser bem maior do que estimava-se e isso gera dificuldades para a teoria do universo insular.

O estudo de Van Maanen, colega de Shapley no observatório de Mount Wilson, sobre o movimento próprio de rotação das nebulosas espirais colocava em cheque a ideia delas serem objetos extra-galácticos. A distância estimada no contexto do universo insular com a medida de rotação de Van Maanen indicava que a velocidade das regiões externas das nebulosas espirais deveriam ser maior que a velocidade da luz.

Outro ponto levantado era a observação de novas. Se as nebulosas espirais estivessem fora da nossa galáxia, o valor da magnitude absoluta das novas observadas nestes objetos seriam ordens de grandeza maior do que as novas observadas na Via Láctea. O argumento de Curtis com relação a este problema das novas era que estes fenômenos poderiam estar relacionados com duas classes de objetos astronômicos. Além disso, Curtis não estava seguro da calibração das novas observadas em nebulosas espirais.

Ambos debatedores estavam certos sobre pontos cruciais e errado em outros. Shapley por exemplo, estava certo em argumentar que a dimensão da Via Láctea era bem maior do que pleiteada por seus contemporâneos defensores do universo insular. Além disso, ele apontou a importância do uso das Cefeidas como indicadores de distância. Por outro lado, Curtis acertou na hipótese do universo insular e em apontar que as nebulosas espirais eram galáxias independentes e separadas da Via Láctea.

Os registros históricos mostram que tanto Curtis quanto Shapley saíram do debate acreditando que haviam levado a melhor. De uma certa forma,

como a proposta de cada um no debate foi diferente, não é errôneo concordar que ambos saíram vitoriosos. Com efeito, nos anos que sucederam o grande debate, a comunidade astronômica continuou dividida em opiniões. Mas vale notar que a importância do debate foi sobretudo organizar as discussões em torno do tema e ajudar a comunidade a identificar os pontos que mereciam ser explorados e melhorados. Como saldo, mais do que Curtis ou Shapley, foi a ciência astronômica que saiu vencedora deste grande debate.

Sobre os tradutores

Júlio C. Fabris (julio.fabris@cosmo-ufes.org) é professor titular do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e pesquisador do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Suas atividades científicas versam sobre física teórica, com especial ênfase em cosmologia e gravitação.

Felipe T. Falciano (ftovar@cbpf.br) é Doutor em Física (2008) pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e Mestre em Filosofia (2017) pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Desde 2009 é pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, vinculado a coordenação COSMO, e pesquisador do CNPq, atuando nas áreas de cosmologia e gravitação.

Referências

- [1] H. Shapley e H. D. Curtis, *The scale of the universe*, Bulletin of the National Research Council **2**(11), 171 (1921). Disponível em <https://archive.org/details/scaleofuniverse00shap/page/172/mode/2up>, acesso em mar. 2024.
- [2] C. A. Whitney, *The Discovery of Our Galaxy* (Random House Inc, New York, 1971).
- [3] R. Berendzen, R. Hart e D. Seeley, *Man Discovers the Galaxies* (Columbia University Press, New York, 1984).
- [4] V. Trimble, *The 1920 Shapley-Curtis Discussion: Background, Issues, and Aftermath*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **107**, 1133 (1995).

- [5] L. Belkora, *Minding the Heavens: the story of our discovery of the Milky Way* (Institute of Physics Publishing, London, 2003).
- [6] H. Shapley, *Through rugged ways to the stars* (New York, 1969).
- [7] I. Kant, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (Harald Fischer Verlag Gmb, 1755), versão em inglês: Eric Watkins (ed.), *Kant: Natural Science* (Cambridge University Press, 2015).

A escala do Universo – Parte I

Harlow Shapley

Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington

Este discurso e o seguinte, do Dr. Heber D. Curtis, são adaptados de palestras ilustres proferidas na Fundação William Ellery Hale perante a Academia Nacional de Ciências, em 26 de abril de 1920. Os autores trocaram os artigos ao prepará-los para publicação, para que cada um pudesse ter a oportunidade de considerar o ponto de vista do outro.

Evolução da ideia do tamanho da galáxia

O universo¹ físico era antropocêntrico para o homem primitivo. Numa fase subsequente do progresso intelectual, centrou-se numa área restrita da superfície da Terra. Ainda mais tarde, para Ptolomeu e sua escola, o universo era geocêntrico. Na época de Copérnico, o Sol, como corpo dominante do sistema solar, era considerado no centro do sistema estelar ou próximo dele. Com a origem de cada uma destas concepções sucessivas, o sistema de estrelas pareceu sempre maior do que se pensava anteriormente. Assim, a importância do homem e da Terra no esquema sideral diminuiu com o avanço do conhecimento do mundo físico, e a nossa concepção das dimensões do universo estelar discernível mudou progressivamente. Não seria possível novas mudanças das nossas concepções? Diante da grande acumulação de informações novas e relevantes, poderemos manter firmemente as nossas antigas concepções cósmicas?

Como consequência do excepcional crescimento das atividades dos grandes observatórios, com os seus poderosos métodos de análise das estrelas e de sondagem do espaço, atingimos uma época, creio eu, em que outro avanço é necessário; a nossa concepção do sistema galáctico deve ser alargada para manter numa relação adequada os objetos que os nossos telescópios encontram; o sistema solar não consegue mais manter uma posição central. Estudos recentes sobre aglomerados e assuntos relacionados parecem-me não deixar

nenhuma alternativa à crença de que o sistema galáctico é pelo menos dez vezes maior em diâmetro – pelo menos mil vezes maior em volume – do que se supunha recentemente.

Dr. Curtis², por outro lado, sustenta que o sistema galáctico tem as dimensões e o arranjo anteriormente atribuídos a ele pelos estudiosos da estrutura sideral — ele apoia as opiniões sustentadas há cerca de uma década por Newcomb, Charlier, Eddington, Hertzsprung, e outros líderes da astronomia estelar. Em contraste com a minha estimativa atual de um diâmetro de pelo menos trezentos mil anos-luz, Curtis descreve a sua posição da seguinte forma:³

Quanto às dimensões da galáxia indicadas pela nossa Via Láctea, até recentemente houve um bom grau de uniformidade nas estimativas daqueles que investigaram o assunto. Praticamente todos deduziram diâmetros de 7.000 a 30.000 anos-luz. Assumirei um diâmetro galáctico máximo de 30.000 anos-luz como representando suficientemente bem esta visão mais antiga que subscrevo, embora esta seja certamente demasiado grande.

Penso que deveria ser salientado que, quando Newcomb escrevia sobre o assunto, há cerca de vinte anos, o conhecimento dos factores especiais que se relacionam diretamente com o tamanho do Universo era extremamente fragmentário em comparação com a nossa informação de hoje. Em 1900, por exemplo, eram conhecidos os movimentos radiais de cerca de 300 estrelas; agora conhecemos as velocidades radiais de milhares.

¹A palavra “universo” é usada neste artigo no sentido restrito, aplicando-se ao conjunto de sistemas siderais atualmente conhecidos.

²Veja Parte II do presente artigo, por Heber D. Curtis.

³Citado de uma cópia manuscrita de seu discurso em Washington

As distâncias precisas eram então registadas para possivelmente 150 das estrelas mais brilhantes, e agora para mais de dez vezes este número. Os espectros eram então disponíveis para menos de um décimo das estrelas para as quais temos hoje esta informação. Praticamente nada se sabia naquela época sobre os métodos fotométricos e espectroscópicos para determinar distâncias; nada sobre velocidades radiais dos aglomerados globulares ou das nebulosas espirais, ou mesmo do fenômeno do fluxo estelar.

Como indicação adicional da importância de examinar novamente as evidências sobre o tamanho dos sistemas estelares, consideremos o grande aglomerado globular em Hércules – uma vasta organização sideral sobre a qual tínhamos, até recentemente, apenas ideias vagas. Devido a pesquisas extensas e variadas, realizadas durante os últimos anos no Monte Wilson e em outros lugares, sabemos agora as posições, magnitudes e cores de todas as suas estrelas mais brilhantes, e muitas relações entre cor, magnitude, distância do centro e densidade de estrelas. Conhecemos algumas destas importantes correlações com maior certeza no aglomerado de Hércules do que na vizinhança solar. Agora temos os espectros de muitas estrelas individuais e o tipo espectral e a velocidade radial do aglomerado como um todo. Conhecemos os tipos e períodos de variação da luz das suas estrelas variáveis, as cores e tipos espetrais destas variáveis, e também algo sobre a luminosidade absoluta das estrelas mais brilhantes do aglomerado a partir da aparência dos seus espectros. Será surpreendente, portanto, que nos aventuremos a determinar a distância de Messier 13 e de sistemas semelhantes com mais confiança do que era possível há dez anos, quando nenhum destes factos era conhecido, ou mesmo considerado seriamente em especulações cósmicas?

Se ele estivesse escrevendo agora, com conhecimento destes desenvolvimentos relevantes, acredito que Newcomb não manteria a sua visão anterior sobre as dimensões prováveis do sistema galáctico.

Por exemplo, Professor Kapteyn encontrou ocasião, com o progresso dos seus elaborados estudos das leis da luminosidade e densidade estelar, para indicar dimensões da galáxia maiores do que as anteriormente aceitas. Num artigo publicado recentemente em Mount Wilson Contribu-

tion, nº 188,⁴ ele descobriu, como resultado de uma pesquisa que se estendeu por cerca de 20 anos, que a densidade das estrelas ao longo do plano galáctico é bastante apreciável a uma distância de 40.000 anos-luz — dando um diâmetro do sistema galáctico, excluindo nuvens estelares distantes da Via Láctea, cerca de três vezes o valor que Curtis admite como máximo para toda a galáxia. Da mesma forma, Russell, Eddington e, creio, Hertzsprung, agora subscrevem valores maiores de dimensões galácticas; e Charlier, numa palestra recente perante a Associação Astronômica Sueca, aceitou as características essenciais indicando uma galáxia de maior dimensão, muito embora anteriormente tenha identificado o sistema local de estrelas B com todo o sistema galáctico e obtido as distâncias dos aglomerados e a dimensão da galáxia apenas um centésimo do tamanho que deduzo.

Pesquisando a vizinhança solar

Recordemos primeiro que o universo estelar, tal como o conhecemos, parece ser um esferoide ou elipsoide muito achatado — um sistema em forma de disco composto principalmente por estrelas e nebulosas. O sistema solar não está longe do plano médio desta organização achatada que chamamos de sistema galáctico. Olhando para longe do plano vemos relativamente poucas estrelas; olhando ao longo do plano, através de uma grande profundidade do espaço povoado de estrelas, vemos um grande número de objetos siderais que constituem a faixa de luz que chamamos de Via Láctea. Os aglomerados de estrelas vagamente organizados, como as Plêiades, as nebulosas difusas, como a grande nebulosa de Orion, as galáxias planetárias nebulosas, das quais a nebulosa em anel em Lyra é um bom exemplo, as nebulosidades escuras — todos esses tipos siderais parecem fazer parte do grande sistema galáctico e situam-se quase exclusivamente ao longo do plano da Via Láctea. Os aglomerados globulares, embora não estejam na Via Láctea, também estão ligados ao sistema galáctico; as nebulosas espirais parecem ser objetos distantes, podendo estar mesmo fora das partes mais populosas da região galáctica.

⁴A contribuição é publicada em conjunto com o Dr. van Rhijn.

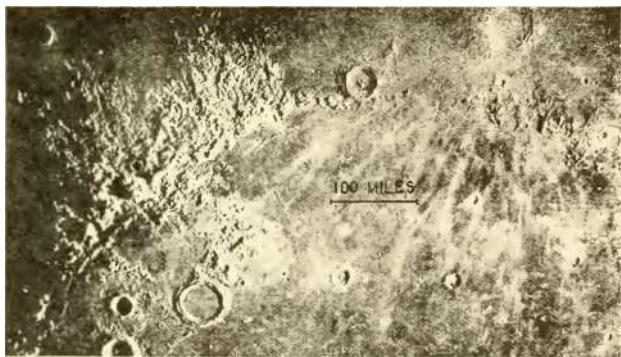


Figura 1: A região do Apenninus na superfície da Lua como fotografada por um refletor de 100-polegadas. Fotografado por F. G. Pease.

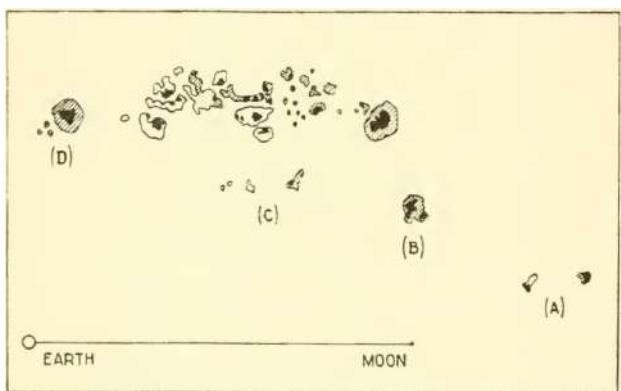


Figura 2: Um grupo de manchas solares surgidas primeiramente em Fevereiro de 1920 e durando por cerca de 100 dias. As regiões com e sem sombras indicam polaridade magnética de sinais opostos.

Esta concepção do sistema galáctico, como uma organização achatada de estrelas e nebulosas em forma de relógio, com aglomerados globulares e nebulosas espirais como objetos externos, é geralmente aceita pelos estudiosos do assunto; mas na questão das distâncias dos vários objetos siderais – o tamanho do sistema galáctico – há, como sugerido acima, opiniões amplamente divergentes. Iremos, portanto, primeiro considerar brevemente as dimensões daquela parte do universo estelar sobre a qual existe unanimidade essencial de opinião, e mais tarde discutiremos com mais detalhes o campo mais amplo, onde parece haver necessidade de modificação da visão convencional mais antiga.

Possivelmente a forma mais conveniente de ilustrar a escala do universo sideral seja através das nossas réguas de medição, que vão das unidades terrestres às dos sistemas estelares. Na superfície da Terra expressamos distâncias em uni-

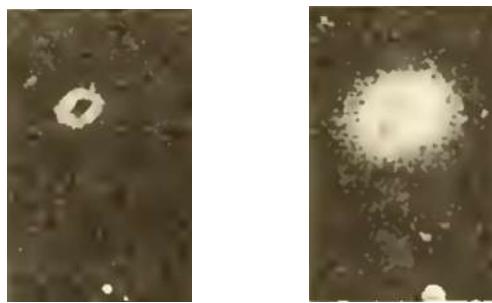


Figura 3: Duas fotografias sucessivas na mesma placa da nebulosa difusa N. G. C. 221, com o refletor de 100 polegadas, para ilustrar a possibilidade de aumentar consideravelmente a potência fotográfica de um grande refletor através da utilização de dispositivos acessórios. O tempo de exposição para a fotografia da esquerda foi de quinze minutos; foi de cinco minutos para a fotografia da direita, efetuada com o auxílio do intensificador fotográfico descrito em Proc. Nat. Acad. Set., 6, 127, 1920. Para a elaboração da figura, as duas fotografias foram ampliadas à mesma escala.

dades como polegadas, pés ou milhas. Na Lua, como pode ser visto na fotografia anexa feita com o refletor de 100 polegadas, a milha ainda é uma unidade de medida utilizável; uma escala de 100 milhas é indicada na região lunar.

Contudo, a nossa escala de medição deve ser grandemente aumentada quando consideramos as dimensões de uma estrela – distâncias na superfície do nosso Sol, por exemplo. As grandes manchas solares mostradas na ilustração não podem ser medidas convenientemente em unidades apropriadas à distância terrestre – na verdade, toda a Terra não é muito grande em comparação. A unidade para medir as distâncias do Sol aos planetas que o acompanham é, no entanto, 12.000 vezes o diâmetro da Terra; é a chamada unidade astronômica, a distância média da Terra ao Sol. Esta unidade, com 93 milhões de milhas de comprimento, é adequada para as distâncias de planetas e cometas. Provavelmente seria suficiente medir as distâncias de quaisquer planetas e cometas que possam existir nas proximidades de outras estrelas; mas, por sua vez, torna-se complicado expressar as distâncias de uma estrela a outra, pois algumas delas estão a centenas de milhões, até mesmo a milhares de milhões, de unidades astronômicas de distância.

Isto leva-nos a abandonar a unidade astronômica e a introduzir o ano-luz como medida para sondar a profundidade do espaço estelar. A distância que a luz percorre num ano é algo inferior a

seis milhões de milhões de milhas. A distância da Terra ao Sol é, nessas unidades, de oito minutos-luz. A distância até a Lua é de 1,2 segundos-luz. Em algumas fases dos nossos problemas astronômicos (estudar fotografias de espectros estelares) fazemos medidas microscópicas diretas de um décimo de milésimo de polegada; e indiretamente medimos mudanças no comprimento de onda da luz um milhão de vezes menores que isso; ao discutir a disposição dos aglomerados globulares no espaço, devemos medir cem mil anos-luz. Expressando essas grandes e pequenas medidas com referência à velocidade da luz, temos uma ilustração da escala do universo do astrônomo — suas medidas variam desde a trilionésima parte de um bilionésimo de um segundo de luz até mais de mil séculos-luz. A proporção da maior medida para a menor é de 10^{33} para 1.

Deve-se notar que a luz desempenha um papel muito importante no estudo do universo; conhecemos a física e a química das estrelas apenas através de sua luz, e expressamos sua distância de nós por meio da velocidade da luz. Além disso, o ano-luz tem um valor duplo na exploração sideral: é geométrico, como vimos, e é histórico. Diz-nos não apenas a que distância um objeto está, mas também há quanto tempo a luz que examinamos começou a percorrer o seu caminho. Você não vê o Sol onde ele está, mas onde estava há oito minutos. Não se veem estrelas fracas da Via Láctea como são agora, mas é mais provável que se vejam como eram quando as pirâmides do Egito estavam sendo construídas; e os antigos egípcios os viam como eram em uma época ainda mais remota. Estamos, portanto, cronologicamente muito atrás dos acontecimentos quando estudamos as condições ou o comportamento dinâmico em sistemas estelares remotos; os movimentos, emissões de luz e variações agora investigados no aglomerado de Hércules não são contemporâneos, mas, se meu valor da distância estiver correto, são fenômenos de 36 mil anos atrás. A grande idade desses pulsos de energia radiante que chegam não é, entretanto, nenhuma desvantagem; na verdade, a sua antiguidade foi aproveitada para testar a velocidade da evolução estelar, para indicar as enormes idades das estrelas, para sugerir a vasta extensão do universo no tempo e no espaço.

Tomando o ano-luz como uma unidade satisfatória para expressar a dimensões dos sistemas

siderais, consideremos as distâncias de estrelas e aglomerados vizinhos e mencionemos brevemente os métodos de dedução de suas posições espaciais. Para objetos estelares próximos podemos fazer medidas trigonométricas diretas de distância (paralaxe), usando a órbita da Terra ou o caminho do Sol através do espaço como linha de base. Para muitas das estrelas mais distantes estão disponíveis métodos espectroscópicos, usando a aparência dos espectros estelares e o brilho aparente facilmente mensurável das estrelas. Para certos tipos de estrelas, muito distantes para dados espectroscópicos, ainda existe a possibilidade de obter a distância por meio do método fotométrico. Este método é particularmente adequado para estudos de aglomerados globulares; consiste primeiro em determinar, de alguma forma, a real luminosidade de uma estrela, isto é, sua chamada magnitude absoluta, e em segundo lugar, na medição de sua magnitude aparente. Obviamente, se uma estrela de brilho real conhecido se afasta para distâncias cada vez maiores, o seu brilho aparente diminui; portanto, para tais estrelas de magnitude absoluta conhecida, é possível, usando uma fórmula simples, determinar a distância medindo a magnitude aparente.

Parece, portanto, que embora o espaço possa ser explorado até uma distância de apenas algumas centenas de anos-luz por métodos trigonométricos diretos, não somos forçados, pela nossa incapacidade de medir ângulos ainda menores, a extrapolar com incerteza ou a fazer suposições vagas relativas a regiões distante ao espaço, pois as distâncias determinadas trigometricamente podem ser usadas para calibrar as ferramentas e métodos mais novos e menos restritos. Por exemplo, os métodos trigonométricos de medição da distância à Lua, ao Sol e às estrelas mais próximas são decididamente indiretos, em comparação com a medição linear da distância na superfície da Terra, mas não são por essa razão inexatos ou questionáveis em princípio. Os métodos espectroscópicos e fotométricos de medição de grandes distâncias estelares também são indiretos, em comparação com a medição trigonométrica de pequenas distâncias estelares, mas também não são, por essa razão, pouco confiáveis ou de valor duvidoso. Estas grandes distâncias não são extrações. Por exemplo, no método espectroscópico, as magnitudes absolutas derivadas de dis-

tâncias medidas trigonometricamente são usadas para derivar as curvas que relacionam as características espetrais à magnitude absoluta; e as paralaxes espectroscópicas de estrelas individuais (próximas ou remotas) são, quase sem exceção, interpolações. Assim, os dados das estrelas mais próximas são utilizados para fins de calibração e não como base para extração.

Por um método ou outro, as distâncias de quase 3.000 estrelas individuais na vizinhança solar foram agora determinadas; apenas algumas estão a dez anos-luz do Sol. A uma distância de cerca de 130 anos-luz encontramos as Híades, o conhecido aglomerado de estrelas que pode ser visto a olho nu; a uma distância de 600 anos-luz, de acordo com as extensas investigações de Kapteyn, chegamos ao grupo de estrelas azuis em Orion – outro aglomerado fisicamente organizado composto por estrelas gigantes em luminosidade. A distâncias comparáveis aos valores acima encontramos também o grupo Escorpião-Centauro, as Plêiades, o sistema Ursa Maior.

Esses aglomerados próximos são especificamente mencionados por dois motivos.

Em primeiro lugar, desejo salientar a prevalência, em todo o sistema galáctico, de aglomerados de estrelas, organizados de diversas maneiras quanto à densidade estelar e ao conteúdo estelar total. A organização gravitacional das estrelas é uma característica fundamental do universo uma estrela dupla é um aspecto dos aglomerados estelares, um sistema galáctico é outro. Podemos, de fato, traçar o motivo do agrupamento desde os mais ricos aglomerados globulares isolados, como o sistema de Hércules, até aos grupos próximos vagamente organizados, tipificados nas estrelas brilhantes da Ursa Maior. Se estivesse cem vezes a sua presente distância, o aglomerado de Orion seria muito parecido com Messier 37 ou Messier 11: dezenas de aglomerados observados apenas por telescópios têm a forma geral e a densidade estelar das Plêiades e das Híades. A diferença entre aglomerados brilhantes e fracos do sistema galáctico parece ser apenas uma questão de distância.

Em segundo lugar, desejo enfatizar o fato de que usamos as estrelas próximas como padrões de luminosidade, particularmente as estrelas azuis do tipo espectral B que são membros de aglomerados estelares. Nisto reside um ponto muito

importante na aplicação de métodos fotométricos. Poderíamos, talvez, questionar a validade de comparar as estrelas isoladas na vizinhança do Sol com estrelas num aglomerado compacto; mas a comparação de aglomerados de estrelas próximas com aglomerados de estrelas remotos é inteiramente razoável, uma vez que estamos agora tão longe das noções antropocêntricas primitivas que é tolice postular que a distância da Terra tem algo a ver com o brilho intrínseco das estrelas.

Sobre as distâncias dos aglomerados globulares

1. Como afirmado acima, os astrônomos concordam quanto às distâncias às estrelas próximas e aos grupos estelares – a escala da parte do universo que podemos chamar de domínio solar. Mas ainda não há acordo relativamente às distâncias de aglomerados remotos, estrelas e nuvens estelares – a escala do sistema galáctico total. A discordância neste último particular não é uma pequena diferença de alguns por cento, um argumento sobre pequenos detalhes; é uma questão de mil por cento ou mais.

Curtis sustenta que as dimensões que encontro para o sistema galáctico deveriam ser divididas por dez ou mais (ver citação na página 172); portanto, esse tamanho galáctico não impede a interpretação das nebulosas espirais como galáxias comparáveis (uma teoria que ele defende por outros motivos, mas que considera incompatível com os valores maiores das dimensões galácticas). Em seu discurso em Washington, no entanto, ele simplificou bastante a presente discussão ao aceitar os resultados de estudos recentes sobre os seguintes pontos significativos.

Proposição A — Os aglomerados globulares fazem parte da nossa galáxia, portanto o tamanho do sistema galáctico propriamente dito não é provavelmente menor que o tamanho do sistema subordinado de aglomerados globulares.

Proposição B — As distâncias derivadas no Observatório de Monte Wilson para aglomerados globulares em relação uns aos outros estão essencialmente corretas. Isto implica, entre outras coisas, que (1) a absorção de luz no espaço não afetou sensivelmente os resultados, e (2) os aglomerados globulares são muito semelhantes em es-

trutura e constituição, diferindo principalmente na distância. (Esses valores relativos são baseados em diâmetros aparentes, magnitudes integradas, magnitudes de estrelas gigantes individuais ou grupos de estrelas gigantes e variáveis Cefeidas; Charlier obteve praticamente os mesmos resultados apenas com diâmetros aparentes, e Lundmark obteve a partir de diâmetros aparentes e magnitudes integradas.)

Proposição C — Estrelas em aglomerados em partes distantes da Via Láctea não são peculiares — isto é, a uniformidade das condições e dos fenômenos estelares prevalece naturalmente em todo o sistema galáctico.

Também partilhamos a mesma opinião, creio eu, nos seguintes pontos.

- (a) O sistema galáctico é uma organização estelar extremamente achatada e a aparência Via Láctea é em parte devido à existência de nuvens distintas de estrelas, e é em parte o resultado da profundidade ao longo do plano galáctico.
- (b) As nebulosas espirais são, em sua maioria, objetos muito distantes, provavelmente não membros físicos do nosso sistema galáctico.
- (c) Se a nossa galáxia se aproximar da ordem maior de dimensões, surge imediatamente uma séria dificuldade para a teoria de que as nebulosas espirais são galáxias de estrelas comparáveis em tamanho às nossas: seria necessário atribuir magnitudes impossivelmente grandes às novas estrelas que aparecem nas nebulosas espirais.

2. Através de um acordo aproximado sobre os pontos acima, o caminho é aberto para que a diferença notável possa ser claramente declarada: Curtis não acredita que o valor numérico da distância que deduzo para qualquer aglomerado globular seja da ordem correta de grandeza.

3. O presente problema pode ser estreitamente restrito, portanto, e pode ser formulado da seguinte forma: mostre que qualquer aglomerado globular é aproximadamente tão distante quanto derivado das observações do Observatório de Monte Wilson; então a distância de outros aglomerados será aproximadamente correta (ver Proposição B), o sistema de aglomerados e o sis-

tema galáctico terão dimensões da ordem atribuída (ver Proposição A), e a teoria das espirais da “galáxia comparável” terá encontrado uma dificuldade séria, embora talvez não insuperável.

Em outras palavras, para manter minha posição será suficiente mostrar que qualquer um dos aglomerados globulares brilhantes tem aproximadamente a distância em anos-luz dada abaixo, em vez de uma distância de um décimo deste valor ou menos:⁵

Aglomerado	Distância em anos-luz	Magnitude fotográfica média das 25 estrelas mais brilhantes	
		Aparente	Absoluta
Messier 13	36.000	13,75	-1,5
Messier 3	45.000	14,23	-1,5
Messier 5	38.000	13,97	-1,4
Omega			
Centauri	21.000	12,3	-1,8

Da mesma forma, seria suficiente mostrar que os objetos brilhantes são estrelas gigantes (cf. última coluna acima), em vez de estrelas de luminosidade comparável à do Sol.

4. Pela observação sabemos que alguns ou os quatro aglomerados listados na tabela contêm:

- (a) Um intervalo de pelo menos nove magnitudes (aparente e absoluta) entre as estrelas mais brilhantes e mais fracas.
- (b) Uma faixa de índice de cores de $-0,5$ a $+2,0$, correspondendo a toda a gama de cores comumente encontrada em conjuntos de estrelas.
- (c) Estrelas dos tipos B, A, F, G, K, M (a partir das observações diretas de espectros), e que esses tipos estão em concordância suficiente com as classes de cores para permitir o uso das considerações estatísticas comuns onde os espectros ainda não são conhecidos.

⁵Na versão final do artigo seguinte, Curtis qualificou sua aceitação das proposições anteriores de tal maneira que, em alguns detalhes numéricos, as comparações dadas abaixo não são mais aplicáveis com precisão aos seus argumentos; Acredito, porém, que as comparações contrastam corretamente a visão atual com aquela geralmente aceita alguns anos atrás.

- (d) Variáveis Cefeidas e de aglomerados que são certamente análogas a variáveis galácticas dos mesmos tipos, em espectro, mudança de cor, duração do período, quantidade de variação de luz e todos os caracteres de a curva de luz.
- (e) Variáveis irregulares, vermelhas, de pequeno alcance, do tipo Alpha Orionis, entre as estrelas mais brilhantes do aglomerado. Muitas estrelas vermelhas e amarelas com aproximadamente a mesma magnitude das estrelas azuis, em óbvia concordância com os fenômenos estelares gigantes do sistema galáctico, e claramente em desacordo com tudo o que sabemos sobre as relações de cor e magnitude das estrelas anãs.

5. Destas considerações preliminares destacamos duas deduções especiais.

Primeiro, um aglomerado globular é um “universo” bastante completo por si só, com fenômenos estelares típicos e representativos, incluindo diversas classes de estrelas que na vizinhança solar são reconhecidas como gigantes em luminosidade.

Em segundo lugar, estamos muito bem situados para o estudo de aglomerados distantes – mais externos do que internos. Assim obtemos uma visão dimensional abrangente, podemos determinar luminosidades reais relativas em vez de luminosidades aparentes relativas, e temos a vantagem distinta de que as estrelas mais luminosas são facilmente isoladas e as mais facilmente estudadas. Nenhuma das estrelas mais brilhantes de um aglomerado nos escapa. Se gigantes ou supergigantes existem, são necessariamente as estrelas que estudamos. Não podemos lidar legitimamente com o brilho médio das estrelas em aglomerados globulares porque os limites mais tênues estão aparentemente muito além do nosso poder dos telescópios atuais. Nossas fotografias comuns registram apenas os emissores mais poderosos — abrangendo uma faixa de apenas três ou quatro magnitudes no topo da escala de luminosidade absoluta, enquanto no domínio solar temos uma faixa extrema conhecida de 20 magnitudes em brilho absoluto e um intervalo geralmente estudado de doze magnitudes ou mais.

6. Vamos agora examinar algumas das condi-

ções que existiriam no aglomerado de Hércules (Messier 13) com base nos dois valores opostos para sua distância:

(a) As estrelas azuis.— As cores das estrelas têm sido reconhecidas há muito tempo como características dos tipos espetrais e como sendo de uma ajuda inestimável no estudo de estrelas fracas para as quais as observações espectroscópicas são difíceis ou impossíveis. O índice de cor, conforme usado em Mount Wilson, é a diferença entre as chamadas magnitudes fotográficas (pg) e fotovisuais (pv) — a diferença entre o brilho dos objetos em azul-violeta e em brilho amarelo-verde. Para um índice de cor negativo ($C.I. = pg - pv < 0,0$) as estrelas são chamadas de azuis e o tipo espectral correspondente é B; para estrelas amarelas, como o Sol (tipo G), o índice de cor é de cerca de +0,8 mag.; para estrelas mais vermelhas (tipos K, M), o índice de cor excede uma magnitude.

Um dos primeiros resultados do estudo fotográfico de Messier 13 em Mount Wilson foi a descoberta de um grande número de estrelas de índices de cor negativos. Resultados semelhantes foram obtidos posteriormente em outros aglomerados globulares e abertos, e entre as estrelas das nuvens galácticas. Naturalmente, esses índices de cores negativos em aglomerados foram considerados sem dúvidas para indicar estrelas do tipo B — uma suposição que mais tarde foi verificada espectroscopicamente com os refletores de Mount Wilson.⁶

A existência de estrelas do tipo B de magnitude 15 no aglomerado de Hércules parece responder decisivamente à questão da sua distância, porque as estrelas B na vizinhança solar são invariavelmente gigantes (mais de cem vezes mais brilhantes que o Sol, em média), e tal estrela gigante só pode parecer ter a magnitude 15 se estiver a mais de 30.000 anos-luz de distância.

Temos uma abundância de material sobre distâncias e magnitudes absolutas das centenas de estrelas tipo B vizinhas — existem medidas diretas de distância, bem como distâncias médias determinadas a partir de movimentos paraláti-

⁶Adams e van Maanen publicaram há vários anos as velocidades radiais e os tipos espetrais de um número de estrelas B no aglomerado duplo em Perseus, Ast. Jour., Albany NY, 27, 1913 (187-188).

	36.000 anos-luz	3.600 anos-luz, ou menos
a. Magnitude fotográfica absoluta média das estrelas azuis (<i>C.I.</i> < 0,0)	0	+ 5 ou mais fraca
b. Magnitude fotográfica absoluta média dos aglomerados de estrelas	entre -1 e -2	+3,2 ou mais fraca
c. Magnitude mediana absoluta fotovisual de Cefeidas de longo período	-2	+3 ou mais fraca
d. Hipotético movimento próprio anual	0'',004	0'',04, ou maior

cos, de curvas de luminosidade observadas, de movimentos de correntes e de velocidades radiais combinadas com movimento adequado. Russell, Plummer, CharHer, Eddington, Kapteyn e outros trabalharam com essas estrelas com o resultado universal de considerá-las gigantes.

O estudo das estrelas B de Kapteyn é um dos clássicos da astronomia estelar moderna; seus métodos são principalmente os métodos bem experimentados, geralmente usados para estudos de estrelas próximas. Em suas várias listas, mais de setenta por cento de B são mais brilhantes que o zero absoluto da magnitude fotográfica,⁷ e apenas dois de 424 são mais fracas que +3. Este resultado deve ser comparado com o requisito acima mencionado de que as magnitudes absolutas das estrelas azuis em Messier 13 devem ser +5 ou mais fracas na média, se a distância do aglomerado for de 3.600 anos-luz ou menos, e não houver estrela no aglomerado mais brilhante que +3.

Pode ser levantada uma questão quanto à completude do material usado por Kapteyn e outros, pois se apenas as estrelas aparentemente brilhantes forem estudadas, as magnitudes absolutas médias podem ser demasiado elevadas. Kapteyn, no entanto, não tem dúvidas a este respeito, e uma investigação⁸ da distribuição de estrelas do tipo B, baseada no Catálogo Henry Draper, mostra que estrelas tipo B fracas não estão presentes na região de Orion estudada por Kapteyn.

O estudo em aglomerados locais parece estar

⁷ Estrelas dos tipos B8 e B9 são habitualmente tratadas com o tipo A na discussão estatística; mesmo que sejam incluídos com os B's, 64 por cento das magnitudes absolutas de Kapteyn são mais brilhantes que zero e apenas 4 por cento são mais fracas que +2. Nenhuma estrela B8 ou B9 mais fracas que +3 estão nas lisas de Kapteyn.

⁸ Shapley, H., Processo Nat. Acad. Ciência, 5, 1900 (434-440); um tratamento adicional deste problema aparecerá em uma próxima contribuição de Mount Wilson.

praticamente completo sem revelar nenhuma estrela B como fraca, com +5. Mas se o aglomerado de Hércules não estivesse a mais de 3.600 anos-luz de distância, suas estrelas B seriam tão fracas quanto o Sol, e a uniformidade admitida em todo o sistema galáctico (Proposição C) seria contestada: pois embora perto da Terra, seja em aglomerados ou não, as estrelas B são gigantes, longe da Terra em todas as direções, seja nas nuvens da Via Láctea ou em aglomerados, seriam anãs – e a teoria antropocêntrica poderia voltar a ganhar ânimo.

Vamos enfatizar novamente que as estrelas azuis próximas e distantes que estamos comparando são todas estrelas de aglomerados, e que parece não haver nenhuma quebra acentuada na graduação dos aglomerados, seja no conteúdo total ou na distância, dese Orion, os aglomerados abertos fracos até Messier 13.

(b) A magnitude máxima absoluta das estrelas do aglomerado. — Em vários grupos e aglomerados próximos, o brilho fotográfico absoluto máximo, determinado a partir de medidas diretas de paralaxe ou movimento de fluxo ou de ambos, é conhecido por exceder os seguintes valores:

	M
Sistema de Ursa Maior	-1,0
Aglomerado em movimento em Perseus	-0,5
Híades	+1,0
Aglomerado de Scorpio-Centaurus	-2,5
Aglomerado da Nebulosa de Órion	-2,5
Plêiades	-1,0
Grupo 61 Cygni ⁹	+1,0

Nenhum grupo físico próximo é conhecido, com a possível exceção de 61 Cygni, na qual as estrelas mais brilhantes são mais fracas do que +1,0. A

média M da lista de clusters acima é $-0,8$; ainda assim, para todos os grupos físicos distantes, deve ser $+3$ ou menos (não resistindo à certa existência dentro deles de Variáveis Cefeidas e estrelas do tipo B), se a distância de Messier 13 for 3.600 luz-anos ou menos. Mesmo que a distância seja de 8.000 anos-luz, como disse Curtis sugere no artigo a seguir, a média M precisaria ser $+1,4$ ou mais fraca — um valor ainda inconciliável com observações sobre aglomerados próximos.

A exigência de que as estrelas brilhantes em um aglomerado globular devem ser no máximo apenas duas magnitudes mais brilhantes que nosso Sol equivale a dizer que em Messier 13 não há um verdadeiro gigante entre suas trinta ou mais mil estrelas. Isso é essencialmente equivalente, à luz da Proposição B, a sustentar que dos dois ou três milhões de estrelas em aglomerados distantes (cerca de meio milhões dessas estrelas foram realmente fotografadas), não há nenhuma estrela gigante mais brilhante que a magnitude fotográfica absoluta $+2$. E acabamos de ver que as medidas diretas mostram que todos os nossos aglomerados próximos contêm tais gigantes; na verdade alguns aparecem ser composto principalmente por gigantes.

Como mais um teste das distâncias dos aglomerados globulares, um dispositivo especial foi usado com o refletor Hooker. Com um fino prisma colocado no feixe convergente pouco antes do foco, podemos fotografar, para uma estrela (ou para cada grupo de estrelas), um pequeno espectro que se estende não apenas pela região azul normalmente fotografada, mas também em todo o amarelo e vermelho. Usando placas fotográficas especialmente preparadas, sensíveis ao azul e vermelho, mas relativamente insensível no verde-amarelo, o pequeno espectro é dividido ao meio, e a intensidade relativa do azul e partes vermelhas depende, como é bem conhecido, do tipo espectral e magnitude absoluta; gigantes e anãs, do mesmo tipo no sistema de classificação espectral de Harvard, mostram diferenças marcantes nos espectros. Os tipos espetrais de quarenta ou cinquenta estrelas mais brilhantes no aglomerado de Hércules são conhecidos, classificados como de costume com base nas linhas espetrais. Usando o dispositivo descrito acima, uma série de essas estrelas foram fotografadas colocando lado a lado na mesma placa gigantes e anãs bem conhecidas

da vizinhança solar para quais distâncias e magnitudes absolutas são determinadas por medidas diretas de paralaxe. Com base na distância menor para Messier 13, os espectros desses aglomerados de estrelas (sendo então de magnitude absoluta mais fracas que $+4$) devem assemelhar-se aos espectros das anãs. Mas as placas mostram claramente que em brilho absoluto o aglomerado estrelas iguais, e em muitos casos até superiores, às gigantes — um resultado esperado se a distância for da ordem de 36.000 anos-luz.

O procedimento acima é uma variação do método usado por Adams e seus associados em estrelas mais brilhantes onde suficiente dispersão pode ser obtida para permitir intercomparação fotométrica de linhas espetrais sensíveis. Na medida em que foi aplicado a aglomerados, o método espetroscópico usual condiz com as conclusões acima de que as estrelas vermelhas e amarelas brilhantes nos aglomerados são gigantes.

Um argumento muito repetido por Curtis é que a média da magnitude absoluta das estrelas ao redor do Sol é igual ou mais fraca do que o brilho solar, portanto, as estrelas médias que vemos em aglomerados também são anãs. Ou, dito de outra forma, ele argumenta que desde a classe espectral média de um aglomerado globular é do tipo solar e a estrela média do tipo solar perto do Sol tem luminosidade solar, as estrelas fotografadas em aglomerados globulares devem ter luminosidade solar, portanto, não distante. Esta dedução, afirma ele, está em conformidade com a proposição C — uniformidade em todo o universo. Mas ao tirar as conclusões, Curtis aparentemente ignora, primeiro, a existência muito comum de estrelas gigantes vermelhas e amarelas em sistemas estelares e, em segundo lugar, a circunstância mencionada acima na Seção 5 que, ao tratar um sistema externo distante, naturalmente observamos primeiros suas estrelas gigantes. Se o material não for mutuamente extensivo no domínio solar e no aglomerado remoto (e certamente não o é para todos os tipos de estrelas), então a comparação das médias significa praticamente nada por causa da seleção óbvia e vital de estrelas mais brilhantes no aglomerado. A comparação deve ser aglomerado próximo com aglomerado distante, ou das luminosidades dos mesmos tipos de estrelas nos dois lugares.

Suponha que um observador, confinado a uma

pequena área de um vale, tenta medir as distâncias dos picos das montanhas circundantes. Por causa da linha de base curta que lhe permitiu fazer medidas, seu cálculo trigonométrico de paralaxes não tem valor, exceto para as colinas próximas. Nos picos remotos, no entanto, seu telescópio mostra folhagem verde. Primeiro ele assume uniformidade botânica aproximada em todas as áreas visíveis território. Então ele descobre que a altura média de todas as plantas imediatamente ao seu redor (coníferas, palmeiras, ásteres, trevos, etc.) é um pé. Correlacionando esta média com a medida angular altura das plantas visíveis contra a linha do horizonte nos picos distantes ele obtém valores das distâncias. Se, no entanto, ele tivesse comparado a folhagem nas colinas próximas, para as quais há medidas trigonométrica, com a dos picos remotos, ou usou algum método de distinção vários tipos florais, ele não teria confundido pinheiros com ásteres obtido resultados errados para as distâncias da superfície contornando montanhas. Todos os princípios envolvidos no paralaxe botânico do pico de uma montanha têm seus análogos na paralaxe fotométrica de um aglomerado globular.

(c) Variáveis Cefeidas. — Estrelas gigantes de outra classe, as Variáveis Cefeidas têm sido amplamente utilizadas na exploração de grandes aglomerados. Depois de determinar o período de uma Cefeida, sua magnitude absoluta é facilmente encontrada a partir da curva de período-luminosidade derivada das observações e a distância de qualquer aglomerado é então obtida a partir da medida da magnitude aparente. Cefeidas Galácticas e Cefeidas de aglomerados são estreitamente comparáveis pela Proposição C — uma dedução que é amplamente apoiada por observações em Mount Wilson e Harvard, da cor, espectro, curvas de luz e brilho relativos a outros tipos de estrelas.

Curtis baseia suas objeções mais fortes a uma dimensão maior da galáxia pelo uso que fiz das variáveis Cefeidas, questionando a suficiência dos dados e precisão dos métodos envolvidos. Mas acredito que na presente edição há pouco sentido em analisar os detalhes das Cefeidas pois esses detalhes, se quisermos, são qualitativamente bastante independentes na determinação da escala de sistema galáctico, e são apenas resultados qualitativos que estão agora em causa. Poderíamos

descartar completamente as Cefeidas e usar em seu lugar ou as estrelas gigantes vermelhas e métodos espectroscópicos, ou as centenas de estrelas do tipo B sobre as quais os astrônomos estelares mais capazes trabalharam durante anos e encontraram praticamente a mesma distância para o aglomerado Hércules e para outros aglomerados, e obtiveram resultados dimensões frequentemente semelhantes para o sistema galáctico. Na verdade, fundamentar os resultados destas outras fontes fortalece nossa crença nas suposições e métodos envolvidos no uso das variáveis Cefeidas.

Como as distâncias dos aglomerados são dadas pelas variáveis Cefeidas estão qualitativamente em excelente concordância com as distâncias correspondentes dadas pelas estrelas azuis e pelas gigantes amarelas e vermelhas, discutidas nas subseções anteriores, aqui me referirei apenas brevemente aos quatro pontos relacionados ao problema das Cefeidas, primeiro observando que se as distâncias dos aglomerados devem ser divididas por 10 ou 15, o mesmo divisor também deve ser usado para as distâncias derivadas para as Cefeidas galácticas.

(1) A magnitude absoluta média das Cefeidas típicas, de acordo com minha discussão sobre movimentos próprios e correlações de magnitude, é de cerca de $-2,5$. O material sobre movimento próprio também foi discutido independentemente por Russell, Hertzsprung, Kapteyn, Stromberg e Scares. Todos eles aceitam a validade do método, e concordamos em tornar a magnitude média absoluta praticamente a mesma que eu derivo. Scares constata, aliás, a partir de uma discussão de erros prováveis e de possíveis erros sistemáticos, que os movimentos observados são inconciliáveis com um brilho absoluto cinco magnitudes mais fracos, porque nesse caso o movimento médio paralático das Cefeidas mais brilhantes seria da ordem de $0^{\circ},160$ em vez de $0^{\circ}016 \pm 0^{\circ}002$ conforme observado.

As paralaxes trigonométricas e espectroscópicas da Cefeidas galácticas, até onde foram determinadas, concordam com os valores fotométricos em ambientes que exigem alta luminosidade; os métodos espectroscópicos e fotométricos não são totalmente independentes, uma vez que para ambos o ponto zero depende do movimento paralático.

(2) Quando o movimento paralático é usado

para inferir magnitudes absolutas para estrelas individuais (um processo possível apenas quando movimentos peculiares são pequenos e as observações muito boas), as Cefeidas galácticas mais brilhantes indicam uma correlação entre luminosidade e período.¹⁰ A necessidade, no entanto, de negligenciar movimento peculiar individual e erros de observação para este procedimento faz com que a correlação pareça muito menos clara para as Cefeidas galácticas do que para aqueles de sistemas externos (onde os movimentos próprios não são relevantes), e pouca importância poderia ser dada a a curva período-luminosidade se fosse baseada apenas nas Cefeidas locais. Quando os dados adicionais mencionados abaixo também forem tratados desta forma, a correlação é praticamente obscurecida para as Cefeidas galácticas, por causa dos maiores erros de observação.

Por conta da uniformidade provavelmente universal do fenômeno das Cefeidas, no entanto, precisamos conhecer apenas a média paralática do movimento das Cefeidas galácticas para determinar o ponto zero de a curva no que se baseia nas Cefeidas externas; e os movimentos individuais não entram no problema, exceto, como observado acima, para indicar provisoriamente a existência da relação período-luminosidade. É apenas esse movimento paralático médio que outros investigadores usaram para mostrar a luminosidade extremamente alta das Cefeidas. Minhas magnitudes e distâncias absolutas adotadas para todas essas estrelas foram baseadas no período final da curva de luminosidade, e não em movimentos individuais.

(3) Através da gentileza do Professor Boss e do Sr. Roy de Observatório Dudley, foram apresentadas os movimentos próprios para 21 Cefeidas além das 13 da Catálogo Preliminar Geral. O novo material é de relevância relativamente baixa, mas a discussão não publicada por Stromberg daquela parte referente a as estrelas do norte não introduzem nenhuma mudança relevante no resultado para o brilho médio absoluto das Cefeidas.

¹⁰Senhor. Scares chamou minha atenção para um erro na plotagem do cálculo provisório suavizado magnitudes absolutas contra o período logarítmico para as Cefeidas discutidas em Monte Wilson Contribution nº 151. A curva preliminar para as Cefeidas galácticas é mais íngreme do que que as da Pequena Nuvem de Magalhães, Omega Centauri e outros aglomerados.

Paralaxe fotométrico	0',3	(Shapley)
Paralaxe trigonométrico	$0,006 \pm 0,006$	(van Maanen)
Paralaxe espectroscópico	0,004	(Adams, Joy, Burwell)

Deve-se notar que as 18 pseudo-Cefeidas discutidas por Adams e Joy¹¹ são, sem exceção, extremamente brilhantes (absolutamente magnitudes variando de - 1 a - 4); eles são completamente comparáveis com as Cefeidas comuns na distribuição galáctica, nas características espectrais e movimento.

(4) A partir de resultados, não publicados, gentilmente comunicados por van Maanen e por Adams, temos a seguinte verificação do grande distância e alta luminosidade das importantes, de alta velocidade Cefeidas RR Lyra do tipo aglomerado:

O grande movimento próprio desta estrela, 0"25 anual, levou Hertzsprung há alguns anos a suspeitar que a estrela não está distante, e que ele e seus numerosos congêneres em aglomerados são anões. O grande movimento próprio, no entanto, indica alta velocidade real, em vez de proximidade, como mostram os resultados acima. Mais recentemente, Hertzsprung reconsiderou o problema e, usando as variáveis do aglomerado, derivou uma distância do aglomerado globular Messier 3 em concordância essencial com meu valor.

(d) Movimento próprio anual hipotético. – A ausência movimento próprio observável para aglomerados distantes deve ser uma indicação de sua grande distância por causa das altas velocidades conhecidas na linha de visada. A velocidade radial média dos aglomerados globulares parece ser de cerca de 150 km/s. Assumindo, como sempre, uma distribuição aleatória de velocidades, os movimentos transversais de Messier 13 e de aglomerados globulares brilhantes semelhantes devem ser maiores do que os valores bastante apreciáveis de 0,04 por ano se a distância for inferior a 3,600 anos-luz. Nenhum movimento próprio foi encontrado para aglomerados distantes; A Lundmark analisou este assunto especialmente para

¹¹Adams, W. S. e A. H. Joy, Publ. Ast. Soc. Pac., San Francisco, Calif., 31, 1919 (184-186).

cinco sistemas e concluiu que o movimento próprio anual é menor que 0°01.

7. Vamos resumir alguns dos resultados que levam à aceitação de uma escala restrita do sistema galáctico.

Se as distâncias dos aglomerados globulares devem ser diminuídas para um décimo, o poder de emissão de luz de suas estrelas pode ser apenas um centésimo das estrelas de aglomerados locais do mesmo espectro e tipos fotométricos. Como consequência, acredito que o texto esclarecedor de Russell sobre a teoria da evolução espectral teria que ser largamente abandonado, e a brilhante teoria de Eddington sobre estrelas gigantes gasosas precisaria ser grandemente modificada ou totalmente abandonada. Agora ambos as teorias modernas têm sua justificativa, primeiro, na natureza de seus conceitos e postulados e, em segundo lugar, em seu grande sucesso em ajustar fatos observacionais.

Da mesma forma, a lei do período-luminosidade da variação das Cefeidas seria sem sentido; As pesquisas de Kapteyn sobre a estrutura do aglomerado local precisaria de nova interpretação, porque suas leis sobre a luminosidade poderiam ser aplicadas localmente, mas não de forma geral; e uma perda para a astronomia seria a da generalidade dos métodos spectroscópicos para determinar distâncias estelares, pois isso significaria que características espectrais idênticas indicam estrelas com brilhos diferentes em 100 para 1, dependendo apenas se a estrela está na vizinhança solar ou em um aglomerado distante.

2 As dimensões e a configuração do sistema galáctico

Quando aceitamos a visão de que a distância do aglomerado de Hércules é tal que seus fenômenos estelares estão em harmonia com fenômenos estelares locais — suas estrelas mais brilhantes são gigantes típicas, suas Cefeidas comparáveis às nossas — então segue-se que aglomerados globulares mais fracos e menores ainda estão mais distantes do que 36.000 pontos-luz anos. Um terço dos aglomerados agora conhecidos estão mais distantes do que 100.000 anos-luz; o mais distante tem

mais de 200.000 luz- anos de distância, e o diâmetro de todo o sistema de aglomerados globulares tem cerca de 300.000 anos-luz.

Como a afiliação dos aglomerados globulares à galáxia é mostrado pela sua concentração no plano da Via Láctea e seu arranjo simétrico em relação a ele, também segue que o sistema galáctico de estrelas é tão grande quanto esta parte subordinada. Durante o ano passado, encontramos variáveis Cefeidas e outras estrelas de alta luminosidade entre as estrelas da décima quinta magnitude das nuvens galácticas; isso só pode significar que algumas partes das nuvens estão mais distantes do que o aglomerado de Hércules. Isto parece ser uma boa razão, portanto, para acreditar que regiões isoladas do sistema galáctico povoadas por estrelas estendem-se pelo menos até o aglomerados globulares.

Uma consequência de aceitar a teoria de que os aglomerados descrevem a forma e a extensão do sistema galáctico, é que o Sol se encontra muito distante do centro da galáxia. É apropriado admitir que não estamos longe do centro de um grande aglomerado ou nuvem local, mas essa nuvem está a pelo menos 50.000 anos-luz do centro galáctico. Há vinte anos, Newcomb observou que o Sol parece estar no plano galáctico porque a Via Láctea é um grande círculo — uma faixa envolvente de luz — e que o Sol também aparece perto do centro do universo porque a densidade de estrelas diminui com a distância em todas as direções. Mas ele conclui do seguinte modo:

Ptolomeu mostrou por meio de evidências que, do seu ponto de vista, pareciam tão sólidas quanto o que citamos, que a Terra estava fixada no centro do universo. Não podemos ser vítimas de alguma falácia, como ele foi?

A nossa presente resposta à pergunta de Newcomb é que temos estado vítimas de métodos restritos de medição de distância e da posição do Sol perto do centro de um sistema subordinado; fomos induzidos em erro, pelos fenômenos relacionados, a pensarmos que estamos no centro das coisas. Praticamente da mesma maneira como o homem antigo foi enganado pela rotação da Terra, com o consequente fenômeno movimento diário aparente de todos os corpos celestes ao redor da Terra, acreditando que até mesmo seu pequeno planeta estava o centro do universo, e que seus deuses terrestres criaram e julgaram tudo.

Se o homem tivesse alcançado a sua atual posição intelectual num período geológico posterior, ele poderia não ter sido levado a esses vãos conceitos a respeito de sua posição no universo físico, pois o sistema solar está se afastando rapidamente do plano galáctico e está se movendo para longe do centro do aglomerado local. Se esse movimento permanecer inalterado em direção e quantidade, em cem milhões de anos ou então a Via Láctea será bem diferente de uma faixa círcundante de nuvens estelares, o aglomerado local será um objeto distante, e a densidade das estrelas não diminuirá mais em todas as direções com a distância do Sol.

Outra consequência da conclusão de que o sistema galáctico tem um diâmetro da ordem de 300.000 anos-luz, é a dificuldade mencionada anteriormente que resulta da teoria das "galáxias comparáveis" relativas às nebulosas espirais. Não farei uma descrição e discussão deste discutível problema. Uma vez que a teoria provavelmente permanece ou cai junto com a hipótese de uma pequeno sistema galático, não faz muito sentido discutir outro material sobre o assunto, especialmente tendo em vista as rotações recentemente medidas de nebulosas espirais que parecem fatais para tal interpretação.

Parece-me que as provas, para além dos testes reconhecidamente críticos dependendo do tamanho da galáxia, se opõem à visão que as espirais são galáxias de estrelas comparáveis com a nossa.

Na verdade, não parece ainda haver razão para alterar o hipótese provisória de que as espirais não são compostas de estrelas, mas são objetos verdadeiramente nebulosos. Três resultados muito recentes são, acredito, claramente severos para a teoria de que as nebulosas espirais são galáxias comparáveis — (1) A dedução de Scares de que nenhuma das nebulosas espirais conhecidas tem um brilho superficial tão pequeno quanto o da nossa galáxia; (2) O estudo de Reynold sobre a distribuição de luz e cor em espirais típicas, das quais ele conclui que não podem ser sistemas estelares; e (3) as recentes medidas de van Maanen de rotação na espiral M 33, corroborando seu trabalho anterior sobre Messier 101 e 81, e indicando que estas espirais brilhantes não podem razoavelmente ser os objetos excessivamente distantes como exigido pela teoria.

Mas mesmo que as espirais não sejam sistemas galácticos, podem haver no espaço sideral outros sistemas estelares iguais ou maiores que o nosso — como ainda não reconhecido e possivelmente muito além do poder dos existentes dispositivos ópticos e das presentes escalas de medição. Os telescópios modernos, com acessórios como espectroscópios de alta potência e intensificadores fotográficos, destinam-se a ampliar as investigações em relação ao tamanho do universo muito mais longe no espaço, e contribuir ainda mais para o problema da existência de outras galáxias.

A escala do Universo – Parte II

Heber D. Curtis

Diretor, Allegheny Observatory

Dimensões e estrutura da galáxia

Definição das unidades utilizadas. — A distância percorrida pela luz num ano, $9,5 \times 10^{12}$ km, ou quase seis trilhões de milhas, conhecida como ano-luz, tem sido usada há cerca de dois séculos como meio de visualizar as distâncias estelares e constitui uma unidade conveniente e de fácil compreensão. Ao longo deste documento, as distâncias das estrelas serão expressas em anos-luz.

A magnitude absoluta de uma estrela é frequentemente necessária para que possamos comparar as luminosidades de diferentes estrelas em termos de uma unidade comum. É a magnitude aparente que a estrela teria se fosse observada a partir da distância padrão de 32,6 anos-luz (correspondente a uma paralaxe de $0''1$).

Conhecendo a paralaxe, ou a distância, de uma estrela, a magnitude absoluta pode ser calculada a partir de uma das equações simples:

$$\begin{aligned} \text{Magnitude Absoluta} &= \text{Magnitude Aparente} \\ &+ 5 + 5 \times \log(\text{paralaxe em arcoseg}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Magnitude Absoluta} &= \text{Magnitude Aparente} \\ &+ 7,6 - 5 \times \log(\text{distância em anos-luz}) \end{aligned}$$

Limitações nos estudos das dimensões galácticas. — Por métodos diretos, as distâncias de estrelas individuais podem ser determinadas com considerável precisão até uma distância de cerca de duzentos anos-luz.

A uma distância de trezentos anos-luz (28×10^{14} km) o raio da órbita da Terra ($1,5 \times 10^8$ km) subtende um ângulo ligeiramente superior a $0''01$, e o erro provável das melhores determinações modernas de paralaxe fotográfica ainda não foi reduzido materialmente abaixo deste valor. O método espectroscópico de determinação das distâncias estelares através da magnitude absoluta tem provavelmente, atualmente, as mesmas limitações

que o método trigonométrico, do qual o método espectroscópico depende para a sua escala absoluta.

Foram utilizados vários métodos indiretos que alargam um pouco mais o nosso alcance no espaço para determinar as distâncias médias de grandes grupos ou classes de estrelas, mas não dão qualquer informação sobre as distâncias individuais das estrelas do grupo ou classe. Entre esses métodos, podem ser assinaladas como mais importantes as várias correlações que foram feitas entre os movimentos próprios das estrelas e o movimento paralático devido à velocidade do nosso Sol no espaço, ou entre os movimentos próprios e as velocidades radiais das estrelas.

As limitações de tais métodos de correlação dependem, atualmente, do fato de se conhecerem movimentos próprios precisos, em geral, apenas para as estrelas mais brilhantes. Um movimento de 20 km/segundo através da nossa linha de visada produzirá os seguintes movimentos próprios anuais:

distância (anos-luz)	100	500	1,000
mov. prop. anual	$0''14$	$0''03$	$0''01$

O erro médio provável dos movimentos próprios de Boss é de cerca de $0''006$. Tais métodos de correlação não são, além disso, uma simples questão de comparação de valores, mas tornam-se difíceis e, em certa medida, incertos devido às complexidades intrigantes trazidas pela variação dos movimentos espaciais das estrelas com o tipo espectral, a massa estelar (?), a luminosidade estelar (?) e fatores de comunidade ainda imperfeitamente conhecidos de arraste de estrelas.

Será então evidente que o padrão base disponível em estudos das regiões mais distantes da nossa galáxia é lamentavelmente curta, e que em tais estudos temos de depender largamente de investigações da distribuição e da frequência de ocorrência

de estrelas de diferentes magnitudes aparentes e tipos espetrais, no pressuposto de que as estrelas mais distantes, quando consideradas em grande número, terão uma média aproximadamente igual à das estrelas mais próximas conhecidas. Esta hipótese é razoável, embora não necessariamente correta, uma vez que temos pouco conhecimento certo de regiões galácticas tão distantes como quinhentos anos-luz.

Se todas as estrelas tivessem aproximadamente a mesma magnitude absoluta, ou se isto fosse verdade mesmo para as estrelas de qualquer tipo ou classe particular, o problema de determinar a ordem geral das dimensões da nossa galáxia seria comparativamente fácil.

Mas o problema se torna mais complicado pelo fato de, considerando as estrelas de todos os tipos espetrais, a dispersão da luminosidade absoluta ser muito grande. Mesmo com a exclusão de um pequeno número de estrelas excepcionalmente brilhantes ou ténues, esta dispersão atinge provavelmente dez magnitudes absolutas, o que corresponderia a uma incerteza cem vezes maior na distância de uma dada estrela. No entanto, veremos mais adiante que possuímos informação razoavelmente certa da magnitude absoluta média das estrelas dos diferentes tipos espetrais.

Dimensões da nossa galáxia. — Os estudos da distribuição das estrelas e da relação entre o número de estrelas de magnitudes aparentes sucessivas levaram vários investigadores a postular dimensões bastante concordantes para a galáxia; podem citar-se alguns:

Wolf; cerca de 14,000 anos-luz de diâmetro
Eddington; cerca de 15,000 anos-luz
Shapley (1915); cerca de 20,000 anos-luz
Newcomb; não menos que 7,000 anos-luz;
depois- talvez 30,000 anos-luz de diâmetro
e 5,000 anos-luz de espessura.
Kapteyn; cerca de 60,000 anos-luz.

Estrutura geral da galáxia. — A partir das linhas de investigação acima mencionadas, tem havido um acordo geral semelhante nos resultados deduzidos quanto à forma e estrutura da galáxia:

1. As estrelas não são infinitas em número, nem uniformes em distribuição.
2. A nossa galáxia, delimitada para nós pelos

contornos projetados da Via Láctea, contém possivelmente bilhões de sóis.

3. Esta galáxia tem a forma de uma lente ou de um relógio fino, cuja espessura é provavelmente inferior a um sexto do diâmetro.

4. O nosso Sol está situado razoavelmente próximo da região central da galáxia.

5. As estrelas não estão distribuídas uniformemente pela galáxia. Uma grande parte está provavelmente dentro da estrutura anelar sugerida pela aparência da Via Láctea, ou está disposta em regiões grandes e irregulares de maior densidade estelar. O autor considera que a Via Láctea é, pelo menos, tanto um efeito estrutural como um efeito de profundidade. Foi sugerida uma estrutura em espiral para a nossa galáxia; a evidência de tal estrutura em espiral não é muito forte, exceto quando pode ser apoiada pela analogia das espirais como universos insulares, mas tal estrutura não é impossível nem improvável. A posição do nosso Sol perto da região central da galáxia não é favorável para a determinação precisa da estrutura galáctica atual.

Relativa escassez dos tipos galácticos. — Apesar do tamanho não implica necessariamente complexidade; é um facto notável que, numa galáxia de mil milhões de objetos, observamos, não dez mil tipos diferentes, mas talvez não mais de cinco classes principais, para além dos fenômenos menores do nosso próprio sistema solar.

1. As estrelas. — A primeira e mais importante classe é formada pelas estrelas. De acordo com o tipo de espectro exibido, podemos dividir as estrelas em cerca de oito ou dez tipos principais; mesmo quando incluímos as graduações internas consecutivas dentro dessas classes espetrais, é duvidoso que os métodos atuais nos permitam distinguir até cem subdivisões separadas no total. As velocidades espaciais médias variam de 10 a 30 km/s, havendo um aumento bem marcado na velocidade espacial média à medida que se passa das estrelas azuis para as mais vermelhas.

2. Os aglomerados globulares de estrelas são agregações muito condensadas de dez mil a cem mil estrelas. Talvez uma centena seja conhecida. Embora bastante irregulares no agrupa-

mento, são geralmente consideradas como definitivamente galácticas na distribuição. As velocidades espaciais são da ordem dos 300 km/s.

3. As nebulosas difusas são massas enormes, ténues, semelhantes a nuvens; razoavelmente numerosas; sempre de distribuição galáctica. Mostram frequentemente um espectro gasoso, embora muitas concordem aproximadamente no espectro com as suas estrelas relacionadas. As velocidades espaciais são muito baixas.

4. As nebulosas planetárias são pequenas, redondas ou ovais, e quase sempre com uma estrela central. São conhecidas menos de cento e cinquenta. A sua distribuição é galáctica; o espectro é gasoso; as velocidades espaciais são de cerca de 80 km/s.

5. As espirais. — Talvez um milhão estejam ao alcance de grandes refletores; o espectro é geralmente como o de um aglomerado de estrelas. São enfaticamente não galácticas em distribuição, agrupadas em torno dos pólos galácticos, com forma espiralada. As velocidades espaciais são da ordem dos 1200 km/s.

Distribuição dos tipos celestes. — Com uma, e apenas uma, exceção, todos os tipos de objetos celestes conhecidos mostram uma tal distribuição em relação ao plano da nossa Via Láctea, que não pode haver qualquer dúvida razoável de que todas as classes, exceto esta, são membros integrantes da nossa galáxia. Vemos que todas as estrelas, sejam elas médias, binárias, variáveis ou temporárias, mesmo os tipos mais raros, mostram esta concentração inconfundível em direção ao plano galáctico. O mesmo se passa com as nebulosas difusas e planetárias e, embora de forma um pouco menos definida, com os aglomerados globulares de estrelas.

A única exceção é formada pelas espirais; agrupadas em torno dos pólos da nossa galáxia, parecem abominar as regiões de maior densidade estelar. Parecem ser claramente uma classe à parte. Nunca encontradas na nossa Via Láctea, não há outra classe de objetos celestes com as suas características distintivas de forma, distribuição e velocidade no espaço.

A evidência atualmente disponível aponta fortemente para a conclusão de que as espirais são

galáxias individuais, ou universos insulares, comparáveis à nossa própria galáxia em dimensões e em número de unidades de componentes. Embora a teoria do universo-ilha das espirais não seja um postulado vital numa teoria das dimensões galácticas, no entanto, devido à sua relação indireta com a questão, os argumentos a favor da hipótese do universo-ilha serão incluídos nos que tocam mais diretamente nas dimensões prováveis da nossa própria galáxia.

Outras teorias das dimensões galácticas. — A partir de provas que serão referidas mais adiante, o Dr. Shapley deduziu distâncias muito grandes para os aglomerados globulares de estrelas, e sustenta que a nossa galáxia tem um diâmetro comparável às distâncias que ele deduziu para os aglomerados, a saber, — um diâmetro galáctico de cerca de 300.000 anos-luz, ou pelo menos dez vezes maior do que o anteriormente aceito. Os postulados das duas teorias podem ser delineados da seguinte forma:

Teoria atual:

A nossa galáxia não deve ter mais de 30.000 anos-luz de diâmetro, e talvez 5.000 anos-luz de espessura. Os aglomerados, e todos os outros tipos de objetos celestes, exceto as espirais, são partes componentes do nosso próprio sistema galáctico. As espirais são uma classe à parte, e não objetos intergalácticos. Como universos-ilha, da mesma ordem de grandeza da nossa galáxia, estão distantes de nós 500.000 a 10.000.000, ou mais, anos-luz.

Teoria de Shapley:

A galáxia tem aproximadamente 300.000 anos-luz de diâmetro e 30.000, ou mais, anos-luz de espessura. Os aglomerados globulares são objetos remotos, mas fazem parte da nossa própria galáxia. O aglomerado mais distante está situado a cerca de 220.000 anos-luz de distância. As espirais são provavelmente de constituição nebulosa, e possivelmente não são membros da nossa própria galáxia, afastadas de alguma forma das regiões de maior densidade estelar.

Evidência fornecida pela magnitude das estrelas

A estrela "média".- Será vantajoso considerar as duas teorias das dimensões galácticas do ponto

de vista da estrela média. Qual é o tipo "médio" ou mais frequente de estrela da nossa galáxia ou de um aglomerado globular de estrelas, e se pudermos com alguma probabilidade postular uma tal estrela média, que influência terão as características dessa estrela na questão da sua distância média de nós?

Não há provas adequadas de que as estrelas mais distantes da nossa galáxia sejam de algum modo essencialmente diferentes das estrelas com distância conhecida mais próxima de nós. Parece então que podemos seguramente fazer tais correlações entre as estrelas mais próximas e as mais distantes, tomadas como um grupo. Em tais comparações, as limitações do tipo espectral devem ser observadas tão rigorosamente quanto possível, e os resultados baseados em pequenos números de estrelas devem ser evitados, se possível.

Muitas investigações, com destaque para os estudos de Shapley sobre as cores das estrelas nos aglomerados globulares e os espectros integrados destes objetos e da Via Láctea feitos por Fath, indicam que a estrela média de um aglomerado estelar ou da Via Láctea será, na grande maioria dos casos, algo semelhante ao nosso Sol em termos de tipo espectral, ou seja, essa estrela média estará, em geral, entre os tipos espetrais F e K.

Características das estrelas do tipo F-K de distância conhecida. — As distâncias das estrelas do tipo F-K na nossa própria vizinhança foram determinadas em maior número, talvez, do que para as estrelas de qualquer outro tipo espectral, de modo que a magnitude absoluta média das estrelas deste tipo parece razoavelmente bem determinada. Há todas as razões para acreditar, contudo, que a nossa seleção de estrelas deste ou de outros tipos para determinações diretas de distâncias não tem sido representativa. Os nossos programas de paralaxes têm uma tendência para selecionar estrelas de grande luminosidade ou de grande velocidade espacial.

Os valores de Kapteyn para as magnitudes absolutas médias das estrelas dos vários tipos espetrais são os seguintes:

A curva de luminosidade-frequência mais recente do mesmo investigador coloca o máximo de frequência das estrelas em geral, considerando todos os tipos espetrais em conjunto, na magnitude absoluta +7,7.

Tipo	Média Mag. Abs.
B5	+ 1.6
A5	+3.4
F5	+ 7
G5	+ 10
K5	+ 13
M	+ 15

Uma tabulação recente de cerca de quinhentas paralaxes modernas determinadas fotograficamente coloca a magnitude absoluta média das estrelas do tipo F-K em cerca de +4,5.

A magnitude absoluta média de quinhentas estrelas dos tipos espetrais F a M é próxima de +4, conforme determinado espectroscopicamente por Adams.

Parece certo que os dois últimos valores da magnitude absoluta média são demasiado baixos, isto é, indicam uma luminosidade média demasiada elevada, devido à omissão nos nossos programas de paralaxe das estrelas intrinsecamente mais fracas. As magnitudes absolutas das estrelas anãs são, em geral, determinadas com acurácia razoável; as magnitudes absolutas de muitas das estrelas gigantes dependem de paralaxes pequenas e incertas. Tendo em conta estes fatos, podemos considerar provisoriamente que a magnitude absoluta média das estrelas F-K de distância conhecida não é mais brilhante do que +6; alguns investigadores preferem um valor de +7 ou +8.

Comparação das estrelas da Via Láctea com as estrelas "médias". - Podemos tomar, sem erro grave, as distâncias de 10.000 e 100.000 anos-luz respectivamente, como representando a distância nas duas teorias do nosso ponto no espaço à linha central da estrutura da Via Láctea. Pode então ser elaborado o seguinte quadro sucinto:

Magnitude aparente	Magnitude absoluta correspondente para distância de, -	
	10.000 anos-luz	100.000 anos-luz
10	-2,4	-7,4
12	-0,4	-5,4
14	+1,6	-3,4
16	+3,6	-1,4
18	+5,6	+0,6
20	+7,6	+2,6

Ver-se-á pela tabela acima que as estrelas de magnitudes aparentes 16 a 20, observadas na nossa estrutura da Via Láctea em tão grande número e, pelos seus espectros, que se crê serem predominantemente de tipo F-K, são essencialmente da mesma luminosidade absoluta que as estrelas conhecidas mais próximas destes tipos, se se assumir que estão à distância média de 10.000 anos-luz. O valor mais elevado postulado para as dimensões galácticas exige, por outro lado, uma proporção enorme de estrelas gigantes.

Proporção de estrelas gigantes entre as estrelas de distância conhecida.— Todas as evidências existentes indicam que a proporção de estrelas gigantes numa dada região do espaço é muito pequena. Como bastante representativo de várias investigações, podemos citar os resultados de Schouten, nos quais ele obtém uma densidade estelar média de 166.000 estrelas num cubo de 500 anos-luz de lado, sendo a distribuição em magnitude absoluta a seguinte:

Magnitude Absoluta	Número de Estrelas	Percentual Relativo
-5 a -2	17	0.01
-2 a +1	760	0.5
+1 a +5	26800	16
+5 a +10	138600	83

Comparação das estrelas dos aglomerados globulares com a estrela "média".— A partir de um estudo um tanto superficial dos negativos de dez aglomerados globulares representativos, eu estimo a magnitude visual aparente média de todas as estrelas nestes aglomerados como na vizinhança do décimo oitavo. Instrumentos mais potentes podem eventualmente indicar um valor médio um pouco mais fraco, mas não parece provável que este valor tenha um erro de duas magnitudes. Temos então:

Magnitude aparente de estrela de aglomerado média	Magnitude absoluta correspondente se a distância de,—	
	10.000 a.l.	100.000 a.l.
18	+5,6	+0,6

Mais uma vez, vemos que a estrela F-K média de um aglomerado, se for assumida como estando

a uma distância de 10.000 anos-luz, tem uma luminosidade média aproximadamente igual à encontrada para as estrelas conhecidas mais próximas deste tipo. A distância média maior de 100.000 anos-luz exige uma proporção de estrelas gigantes enormemente maior do que a encontrada nas regiões da nossa galáxia sobre as quais temos dados de distância razoavelmente definidos.

Embora não seja impossível que os aglomerados sejam regiões excepcionais do espaço e que, com uma concentração espacial enorme de sóis, exista também uma concentração única de estrelas gigantes, a hipótese de que as estrelas dos aglomerados são, em geral, como as de distância conhecida parece inherentemente mais provável.

Parece, também, que as dimensões galácticas deduzidas de correlações entre números grandes do que podemos chamar estrelas médias devem prevalecer sobre os valores encontrados a partir de números pequenos de objetos excepcionais, e que, quando as deduções discordam, temos o direito de exigir que uma teoria das dimensões galácticas baseada no objeto ou classe excepcional não deixe de dar uma explicação adequada do objeto ou classe habitual.

A evidência para dimensões galácticas maiores.— Os argumentos a favor de um diâmetro muito maior para a nossa galáxia do que o até agora defendido e as objeções que têm sido levantadas contra a teoria do universo insular das espirais baseiam-se principalmente nas grandes distâncias que foram deduzidas para os aglomerados globulares de estrelas.

Não consigo aceitar a tese de que os aglomerados globulares encontram-se a distâncias da ordem de 100.000 anos-luz, sentindo que são necessárias muito mais provas sobre este ponto antes de ser justificável supor que as estrelas dos aglomerados são predominantemente gigantes e não estrelas médias. Sou também influenciado, talvez indevidamente, por certas incertezas fundamentais nos dados utilizados. As limitações de espaço disponíveis para a publicação desta parte da discussão impedem, infelizmente, um tratamento completo das provas. Ao chamar a atenção para algumas das incertezas nos dados basais, devo renunciar a qualquer espírito de crítica capciosa e aproveitar esta ocasião para expressar o meu respeito pelo ponto de vista do Dr. Shapley e o meu grande apreço pelo trabalho extremamente

valioso que realizou sobre os aglomerados. Estou disposto a aceitar correlações entre grandes massas de dados estelares, quer de magnitudes, velocidades radiais ou movimentos próprios, mas sinto que a dispersão nas características estelares é demasiado grande para permitir a utilização de quantidades limitadas de qualquer tipo de dados, particularmente quando esses dados são da mesma ordem que os erros prováveis dos métodos de observação.

As deduções quanto às distâncias muito grandes dos aglomerados globulares assentam, em última análise, em três linhas de evidência:

1. Determinação das distâncias relativas dos aglomerados, partindo do pressuposto que são objetos da mesma ordem de tamanho real.

2. Determinação das distâncias absolutas dos aglomerados através de correlações entre estrelas variáveis Cefeidas nos aglomerados e na nossa galáxia.

3. Determinação das distâncias absolutas dos aglomerados através de uma comparação das suas estrelas mais brilhantes com as estrelas intrinsecamente mais brilhantes da nossa galáxia.

Destes três métodos, o segundo é o mais valorizado por Shapley.

Parece razoável assumir que os aglomerados globulares são da mesma ordem de tamanho real, e que a partir dos seus diâmetros aparentes as distâncias relativas podem ser determinadas. O autor, no entanto, não colocaria uma ênfase indevida nesta relação. Não parece haver nenhuma boa razão para que não possa existir entre estes objetos uma quantidade razoável de diferença no tamanho real, digamos de três a cinco vezes, diferenças que não impediriam que fossem considerados da mesma ordem de tamanho, mas que introduziriam uma incerteza considerável nas estimativas da distância relativa.

A evidência das estrelas variáveis Cefeidas.— Esta parte da teoria de Shapley baseia-se nas três hipóteses ou linhas de evidência seguintes:

- A. Que existe uma coordenação fina entre a magnitude absoluta e a duração do período para as variáveis Cefeidas da nossa galáxia, semelhante à relação descoberta pela senhorita Leavitt entre as Cefeidas da Pequena Nuvem de Magalhães.

- B. Que, se tiverem períodos idênticos, as Cefeidas em qualquer parte do Universo têm magnitudes absolutas idênticas.

- C. Esta coordenação de magnitude absoluta e duração do período para as Cefeidas galácticas, a derivação da escala absoluta para as suas distâncias e as distâncias dos aglomerados e, combinada com A) e B), as deduções daí resultantes quanto às dimensões muito maiores para a nossa galáxia, dependem quase inteiramente dos tamanhos e das relações internas dos movimentos próprios de onze Cefeidas variáveis.

Sob o primeiro título, será visto mais tarde que a evidência real para tal coordenação entre Cefeidas galácticas é muito fraca. Desde que a Pequena Nuvem de Magalhães não seja, de alguma forma, uma região única do espaço, o comportamento das Cefeidas variáveis nesta Nuvem é, por analogia, talvez o argumento mais forte para postular um fenômeno semelhante entre as Cefeidas variáveis da nossa galáxia.

Infelizmente existe uma grande dispersão em praticamente todas as características das estrelas. O fato das Cefeidas não terem uma quantidade razoável dessa dispersão é contrário a toda a experiência com estrelas em geral. Há muitos que considerarão a suposição feita em B) acima como uma suposição bastante drástica.

Se tabularmos os movimentos próprios destas onze Cefeidas, como dados por Boss, e os seus erros prováveis também, veremos que o movimento próprio médio destas onze estrelas é da ordem de um segundo de arco por século em qualquer das coordenadas; que o erro provável médio é quase metade deste valor, e que os erros prováveis de metade destas vinte e duas coordenadas podem muito bem ser descritos como do mesmo tamanho que os movimentos próprios correspondentes.

As ilustrações relativas à incerteza dos movimentos próprios da ordem de $0''01$ por ano poderiam ser multiplicadas de forma extensa. Os erros fundamentais e inevitáveis nas nossas posições estelares, os erros prováveis das observações meridianas, a incerteza no valor adotado da constante de precessão, as incertezas introduzidas pelas correções sistemáticas aplicadas a diferentes catálogos, todos têm comparativamente pouco efeito quando se utilizam movimentos próprios tão grandes como dez segundos de arco por

século. Os movimentos próprios tão pequenos como um segundo de arco por século são, no entanto, quantidades ainda altamente incertas, independentemente da questão da possível existência de erros sistemáticos. Como ilustração das diferenças entre movimentos próprios tão diminutos como os derivados por várias autoridades, os movimentos próprios de três das mais bem determinadas desta lista de onze Cefeidas, como determinados por Auwers, estão em quadrantes diferentes dos derivados por Boss.

Não parece haver nenhuma boa razão para que as menores coordenadas desta lista de vinte e duas não venham a ser diferentes uma ou duas vezes a sua magnitude atual, com mudanças ocasionais de sinal. Uma quantidade tão pequena de dados presumivelmente incertos é insuficiente para determinar a escala da nossa galáxia, e muitos preferirão esperar por informações adicionais antes de aceitar tal evidência como conclusiva.

Em vista de:

1. As incertezas conhecidas de pequenos movimentos próprios, e,
2. A magnitude conhecida dos movimentos puramente aleatórios das estrelas, a determinação de paralaxes individuais a partir de movimentos próprios individuais nunca pode dar resultados de valor, embora as distâncias médias asseguradas por tais métodos de correlação a partir de um grande número de estrelas sejam aparentemente confiáveis. O método não pode ser considerado válido, e isto aplica-se quer os movimentos próprios sejam muito pequenos quer sejam de tamanho apreciável.

No que diz respeito às Cefeidas galácticas, a curva de Shapley de coordenação entre a magnitude absoluta e a duração do período, embora encontrada através da magnitude absoluta média do grupo de onze, assenta na realidade em paralaxes individuais determinadas a partir de movimentos próprios individuais, como pode ser verificado comparando os seus valores para a parallaxe destas onze estrelas com¹² os valores encontrados diretamente a partir da componente ϵ do movimento próprio (a saber, aquela componente

que é paralela ao movimento do Sol) e do movimento solar. As diferenças entre os dois conjuntos de valores, 0"0002 na média, resultam do sistema bastante elaborado de ponderação utilizado.

O teste final de uma relação funcional é a concordância obtida quando aplicada a dados semelhantes não utilizados originalmente na dedução da relação. Temos de estar preparados para permitir alguma medida de desvio em tal teste, mas quando uma proporção considerável de outros dados disponíveis não concordar dentro de um valor razoável, teremos justificativa para postergar a nossa decisão.

Se a curva de correlação deduzida por Shapley para as Cefeidas galácticas estiver correcta, tanto na sua escala absoluta como relativa, e se for possível determinar distâncias individuais a partir de movimentos próprios individuais, a curva de correlação, usando o mesmo método no que diz respeito aos movimentos próprios (cuja validade não admito), deve ajustar-se bastante bem a outros dados disponíveis de movimento próprio e parallaxe. As paralaxes determinadas diretamente são conhecidas para cinco deste grupo de onze, e para cinco outras Cefeidas. Há, além disso, vinte e seis outras Cefeidas para as quais foram determinados movimentos próprios. Uma delas foi omitida por Shapley devido a irregularidade do período, uma por irregularidade da curva de luz, duas porque os movimentos próprios foram considerados de precisão insuficiente, duas porque os movimentos próprios são anomalamamente grandes; os movimentos próprios das outras foram recentemente investigados no Observatório de Dudley, mas têm menos peso do que os das onze Cefeidas usadas por Shapley.

Na Figura 4, as magnitudes absolutas são plotadas contra o logaritmo do período; a curva é tirada do Mt. Wilson Contr. No. 151, e é a finalmente adoptada por Shapley após a introdução de cerca de doze Cefeidas de longo período em aglomerados, vinte e cinco da Pequena Nuvem de Magalhães, e um grande número de variáveis do tipo aglomerado de curto período em aglomerados com períodos inferiores a um dia, que têm pouco efeito sobre a forma geral da curva. Os círculos barrados representam as onze Cefeidas galácticas utilizadas por Shapley, os pontos pretos as Cefeidas para as quais foram determinadas paralaxes, enquanto os círculos abertos indicam

¹²Contributions from the Mount Wilson Observatory, No. 151, Table V.

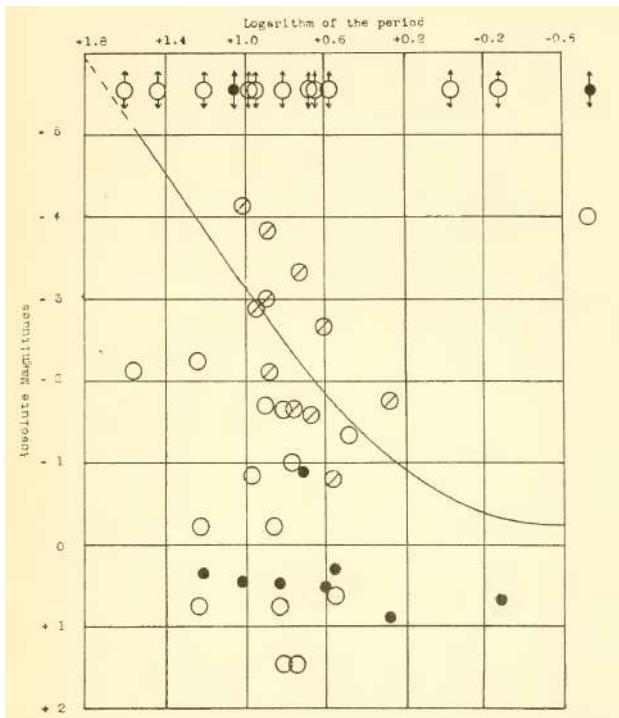


Figura 4: Concordância de outros dados com a curva de correlação luminosidade-período. As magnitudes absolutas calculadas a partir da componente Υ do movimento próprio estão indicadas por círculos; as onze utilizadas por Shapley estão assinaladas com uma barra. Os pontos pretos representam paralaxes determinadas diretamente. As setas ligadas aos círculos na borda superior do diagrama indicam que ou a paralaxe ou a componente Υ do movimento próprio é negativa, e a magnitude absoluta é indeterminada em consequência.

variáveis para as quais os movimentos próprios se tornaram desde então disponíveis, ou não foram utilizadas originalmente por Shapley. Para as estrelas na borda superior do diagrama, as setas anexas indicam que ou a paralaxe, ou o componente Υ do movimento próprio é negativo, de modo que a magnitude absoluta é indeterminada, e pode ser qualquer coisa de infinito para baixo.

Pelo exposto, parece que os dados observacionais disponíveis dão pouco apoio ao fato de haver uma relação período-luminosidade entre as Cefeidas galácticas. Em vista das grandes discrepâncias mostradas por outros membros do grupo quando plotados nesta curva, parece mais sensato esperar por evidências adicionais quanto ao movimento próprio, velocidade radial e, se possível, paralaxe, antes que se possa colocar toda a confiança na hipótese de que as Cefeidas e as variáveis do tipo aglomerado são invariavelmente supergi-

gantes em luminosidade absoluta.

Argumento das estrelas intrinsecamente mais brilhantes.— Se a lei de luminosidade-frequência é a mesma para as estrelas dos aglomerados globulares e para a nossa galáxia, deveria ser possível correlacionar as estrelas intrinsecamente mais brilhantes de ambas as regiões e assim determinar as distâncias dos aglomerados. Parece, a priori, que as estrelas mais brilhantes dos aglomerados devem ser gigantes, ou pelo menos aproximarse desse tipo, se as estrelas dos aglomerados forem como a generalidade das estrelas. Através da aplicação de um método espectroscópico, Shapley descobriu que os espectros das estrelas mais brilhantes em aglomerados se assemelham aos espectros das estrelas gigantes galácticas, um método que deverá ser extremamente útil depois de terem sido feitos testes suficientes para garantir que neste fenômeno, como é infelizmente o caso em praticamente todas as características estelares, não há uma grande dispersão, e também se pequenas diferenças no tipo espectral podem afetar materialmente as deduções.

A estrela "gigante"média.— Determinando a distância do Messier 3 a partir das estrelas variáveis que contém, Shapley deriva então a magnitude absoluta $-1,5$ como a luminosidade média das vinte e cinco estrelas mais brilhantes deste aglomerado. A partir deste valor médio, $-1,5$, ele determina então as distâncias de outros aglomerados. No entanto, em vez de determinar distâncias de aglomerados da ordem dos 100.000 anos-luz por meio de correlações num número limitado de variáveis Cefeidas, uma classe pequena e possivelmente excepcional, e a partir das distâncias assim obtidas deduzir que as magnitudes absolutas de muitas das estrelas mais brilhantes dos aglomerados são tão grandes como -3 , enquanto uma grande proporção é maior do que -1 , parece preferível começar a linha de raciocínio com os atributos de estrelas conhecidas na nossa vizinhança, e proceder a partir delas para os aglomerados.

Qual é a magnitude absoluta média de uma estrela gigante galáctica? Neste ponto há espaço para uma honesta diferença de opinião, e haverá sem dúvida muitos que considerarão as conclusões deste artigo como ultra conservadoras. Limitando-nos aos dados observacionais existentes, não há provas de que um grupo de gigantes galácticas, de tipo espectral médio cerca de G5,

tenha uma magnitude absoluta média tão grande como $-1,5$; é mais provável que esteja na vizinhança de $+1,5$, ou três magnitudes absolutas mais fracas, tornando as distâncias de Shapley quatro vezes maiores.

Neste contexto, vale a pena citar a sugestão de Russell, escrita em 1913, quando os dados de paralaxe eram muito mais limitados e menos confiáveis do que atualmente:

As estrelas gigantes de todas as classes espectrais parecem ter aproximadamente o mesmo brilho médio, — com uma média um pouco acima da magnitude absoluta zero, ou seja, cerca de cem vezes mais brilhante que o Sol. Uma vez que as estrelas desta série... foram selecionadas pelo brilho aparente, que dá uma forte preferência às de maior luminosidade, o brilho médio de todas as estrelas gigantes numa dada região do espaço deve ser inferior a isto, talvez consideravelmente.

Já foi feita alguma referência ao valor duvidoso das paralaxes da ordem de $0''010$, e é dessas paralaxes pequenas ou negativas que depende a maior parte das grandes luminosidades absolutas nas listas atuais. Parece claro que o trabalho de paralaxe deve ter como objetivo a utilização de estrelas de comparação tão fracas quanto possível, e que as correções aplicadas para reduzir as paralaxes relativas a paralaxes absolutas devem ser aumentadas consideravelmente em relação ao que era considerado aceitável há dez anos atrás.

A partir de um estudo das magnitudes absolutas plotadas por tipo espectral de cerca de quinhentas paralaxes diretas modernas, com a devida consideração pelas incertezas das paralaxes diminutas, e tendo em mente que a maioria das gigantes serão dos tipos F a M, parece haver pouca razão para colocar a magnitude absoluta média de tais estrelas gigantes como mais brilhante do que $+2$.

A magnitude absoluta média para as gigantes na lista de Adams de quinhentas paralaxes espectroscópicas é $+1,1$. Os dois métodos diferem mais nas estrelas do tipo G, onde o método espectroscópico mostra um máximo em $+0,6$, que não é muito evidente nas paralaxes trigonométricas.

Em aglomerados de estrelas em movimento como o grupo das Híades, observamos até agora, evidentemente, apenas as estrelas gigantes de tais grupos.

A magnitude absoluta média de quarenta e

quatro estrelas que se acredita pertencerem ao aglomerado móvel das Híades é $+2,3$. A magnitude absoluta média das treze estrelas dos tipos F, G e K é de $+2,4$. A magnitude absoluta média das seis estrelas mais brilhantes é de $+0,8$ (duas A5, uma G e três do tipo K).

As Pléiades não podem ser adequadamente comparadas com estes aglomerados ou com os aglomerados globulares; a sua composição parece ser completamente diferente, uma vez que as estrelas mais brilhantes são em média de tipo B5, e apenas entre as estrelas mais fracas do aglomerado existem algumas tão altas quanto F em tipo. A paralaxe deste grupo é ainda muito incerta. Com o valor de Schouten de $0''037$ a magnitude absoluta média das seis estrelas mais brilhantes é $+1,6$.

Com a devida permissão para a vermelhidão das gigantes nos aglomerados, a magnitude visual média de Shapley das vinte e cinco estrelas mais brilhantes em vinte e oito aglomerados globulares é de cerca de 14,5. Então, a partir da equação dada na primeira seção deste artigo, temos, -

$$+2 = 14,5 + 7,6 - 5 \times \log (\text{distância}), \\ \text{ou , } \log(\text{distância}) = 4,02 = 10.500 \text{ anos-luz} \text{ como distância média.}$$

Se, em vez disso, adotarmos o valor médio de Adams $+1,1$, a distância passa a ser de 17.800 anos-luz.

Qualquer um dos valores para a distância média dos aglomerados pode ser considerado satisfatoriamente próximo dos postulados para uma galáxia das dimensões menores consideradas neste trabalho, tendo em conta as muitas incertezas nos dados. Qualquer um destes valores, também, dará, com base nos mesmos pressupostos, uma distância da ordem dos 30.000 anos-luz para alguns dos aglomerados mais tênues e aparentemente mais distantes. Considero muito duvidoso que qualquer aglomerado esteja realmente tão distante como este, mas não encontro qualquer dificuldade em aceitá-lo provisoriamente como uma possibilidade, sem que isso implique necessariamente alargar a estrutura principal da galáxia a tais dimensões. Embora os aglomerados pareçam concentrados em direção ao nosso plano galáctico, a sua distribuição em longitude é muito irregular, estando quase todos situados no quadrante entre

270° e 0°. Se as espirais são galáxias de estrelas, a sua analogia explicaria a existência de nódulos de condensação frequentes (aglomerados globulares?) situados bem fora e distintos da estrutura principal de uma galáxia.

Deve admitir-se que as estrelas do tipo B constituem uma espécie de dilema em qualquer tentativa de as utilizar para determinar as distâncias dos aglomerados.

A partir da pequenezza dos seus movimentos próprios, a maioria dos investigadores deduziu lumenosidades muito grandes para essas estrelas na nossa galáxia. Examinando os valores de Kapteyn para estrelas deste tipo, ver-se-á que ele encontra um intervalo em magnitude absoluta de +3,25 a -5,47. Dividindo as 433 estrelas da sua lista em dois grupos de magnitude, temos:

Mag. absoluta média 249 estrelas B,	
mais brilhante que mag. absoluta	= -1,32
Mag. absoluta média 184 estrelas B,	
menos brilhante que mag. absoluta	= +0,99
Mag. absoluta média todas	= -0,36

Ou o valor para as estrelas mais brilhantes, -1,32, ou a média de todas, -0,36, é mais de uma magnitude mais brilhante do que a magnitude absoluta média das gigantes dos outros tipos espectrais entre as estrelas galácticas mais próximas.

Agora, esta relação galáctica é aparentemente invertida em aglomerados como M.3 ou M.13, onde as estrelas do tipo B são cerca de três magnitudes mais fracas do que as estrelas K e M mais brilhantes e cerca de uma magnitude mais fracas do que as do tipo G. Supondo que os valores muito elevados atuais para as estrelas galácticas do tipo B estão corretos, se assumirmos uma luminosidade semelhante para as dos aglomerados, devemos atribuir magnitudes absolutas de -3 a -6 às estrelas F a M dos aglomerados, para as quais não temos um paralelo galáctico certo, com uma distância de talvez 100.000 anos-luz. Por outro lado, se as estrelas F a M do aglomerado forem como as estrelas mais brilhantes destes tipos na galáxia, a magnitude absoluta média das estrelas do tipo B será apenas cerca de +3, e demasiado baixa para concordar com os valores atuais das estrelas B galácticas. Eu prefiro aceitar a última alternativa neste dilema, e acreditar que podem

existir estrelas do tipo B com apenas duas a cinco vezes o brilho do Sol.

Embora eu defendia uma teoria das dimensões galácticas aproximadamente um décimo da defendida por Shapley, não significa que mantenha esta razão para qualquer distância específica do aglomerado. Tudo o que tentei fazer foi mostrar que 10.000 anos-luz é uma distância média razoável para os aglomerados.

Há tantas suposições e incertezas envolvidas que estou muito hesitante em tentar atribuir uma determinada distância a um determinado aglomerado, uma hesitação que não é diminuída por uma consideração das seguintes estimativas da distância de M.13 (O Grande Aglomerado em Hércules).

Shapley, 1915, provisório	100.000 anos-luz
Charlier, 1916	170 anos-luz
Shapley, 1917	36.000 anos-luz
Schouten, 1918	4.300 anos-luz
Lundmark, 1920	21.700 anos-luz

Deve ser dito aqui que a estimativa anterior de Shapley era meramente uma suposição provisória para ilustração computacional, mas todas são baseadas em material moderno e ilustram o fato de que boas evidências podem frequentemente ser interpretadas de maneiras diferentes.

A minha própria estimativa, baseada nas considerações gerais delineadas anteriormente neste artigo, seria de cerca de 8.000 anos-luz, e parece-me, atualmente, que esta estimativa está talvez a cinquenta por cento da verdade.

As espirais como galáxias externas

As espirais. — Se as espirais são universos-ilhas, parece razoável e mais provável atribuir-lhes dimensões da mesma ordem que a nossa galáxia. Se, no entanto, as suas dimensões são tão grandes como 300.000 anos-luz, os universos-ilha devem estar situados a distâncias tão enormes que seria necessário atribuir magnitudes absolutas que parecem impossivelmente grandes às novas que apareceram nestes objetos. Por esta razão, a teoria do universo insular tem uma relação indireta com o assunto geral das dimensões galácticas, embora seja, naturalmente, inteiramente possível manter tanto a teoria do universo insular como a crença

nas dimensões maiores da nossa galáxia, fazendo a suposição não improvável de que o nosso próprio universo insular, por acaso, é várias vezes maior do que a média.

Alguns dos argumentos contra a teoria do universo-ilha das espirais foram apresentados de forma convincente por Shapley e serão citados aqui como referência. É justo afirmar que estas declarações anteriores não representam adequadamente o ponto de vista atual de Shapley, que coincide um pouco mais com o defendido pelo autor.

Com o plano do sistema sideral aqui delineado, parece improvável que as nebulosas espirais possam ser consideradas galáxias de estrelas separadas. Para além da evidência até agora existente, os seguintes pontos parecem opostos à teoria do "universo insular": (a) o carácter dinâmico da região de evasão; (b) o tamanho da galáxia; (c) a luminosidade máxima atingível por uma estrela; (d) a crescente frequência de altas velocidades entre outros objetos siderais, particularmente aqueles fora da região de evasão... os trabalhos de aglomerados sugerem fortemente a hipótese que as nebulosas espirais.... são, no entanto, membros da organização galáctica . . as novas em espirais podem ser consideradas como uma estrela que foi engolida pela nebulosidade em movimento rápido. (Publ. Astron. Soc. of the Pacific, Fev. 1918, p. 53.)

O recente trabalho sobre aglomerados estelares, na medida em que lança alguma luz sobre a provável extensão e estrutura do sistema galáctico, justifica uma breve reconsideração da questão das galáxias externas, e aparentemente leva à rejeição da hipótese de que as nebulosas espirais devem ser interpretadas como sistemas estelares separados.

Abandonemos a comparação com a galáxia e assumamos uma distância média para as espirais mais brilhantes que dará uma magnitude absoluta máxima razoável para as novas (e em nota de rodapé; — provisoriamente, digamos, da ordem de 20.000 anos-luz). Além disso, é possível explicar a distribuição peculiar das espirais e a

sua recessão sistemática, supondo-as repelidas de alguma forma do sistema galáctico, que parece mover-se como um todo através de um campo nebuloso de extensão indefinida. Mas a possibilidade destas hipóteses não é, evidentemente, proposta como prova competente contra a teoria do "universo insular". . . . A observação e discussão das velocidades radiais, movimentos internos e distribuição das nebulosas espirais, do brilho real e aparente das novas, da luminosidade máxima das estrelas galácticas e dos aglomerados e, finalmente, das dimensões do nosso próprio sistema galáctico, parecem opor-se definitivamente à hipótese do "universo insular" das nebulosas espirais. . . . [Publ. Astron. Soc. of the Pacific, Out. 1919, pp. 261 ff.]

O dilema das dimensões aparentes das espirais. — Em termos de tamanho aparente, as espirais variam desde um diâmetro de 2° (Andrômeda), até manchas minúsculas de $5''$, ou menos, de diâmetro.

Podem possivelmente variar em tamanho real, aproximadamente na progressão exibida pelas suas dimensões aparentes.

O princípio geral da igualdade aproximada de tamanho para objetos celestes da mesma classe parece, no entanto, inherentemente o mais provável, e tem sido usado em numerosas investigações modernas, por exemplo, por Shapley na determinação das distâncias relativas dos aglomerados.

Com base neste princípio de igualdade aproximada do tamanho real:

Como Universos Insulares

As suas distâncias prováveis vão desde cerca de 500.000 anos-luz (Andrômeda), até distâncias da ordem dos 100.000.000 anos-luz. A 500.000 anos-luz a Nebulosa de Andrômeda teria 17.000 anos-luz de diâmetro, ou seja, da mesma ordem de grandeza da nossa galáxia.

Como fenômenos galácticos

Se a Nebulosa de Andrômeda está apenas a 20.000 anos-luz de distância, as espirais diminutas teriam de estar a distâncias da ordem dos 10.000.000 anos-luz, ou seja, muito fora das dimensões maiores postuladas para a galáxia. Se todos são objetos galácticos, a igualdade de tamanho deve ser abandonada e as espirais diminutas devem ser cerca de mil vezes menor do que as maiores.

*O espectro das Espirais.—**Como Universos Insulares*

O espectro de uma espiral média é indistinguível daquele dado por um aglomerado de estrelas. É aproximadamente do tipo F-G e, em termos gerais, assemelha-se muito ao espectro integrado da nossa Via Láctea. É exatamente o espectro que seria de esperar de uma vasta coleção de estrelas. O espectro das espirais não oferece dificuldades à teoria do universo insular.

Como fenômenos galácticos

Se as espirais são intragalácticas, temos de assumir que são algum tipo de matéria finamente dividida, ou de constituição gasosa. Em ambos os casos, não temos nenhuma evidência adequada e realmente existente pela qual possamos explicar o seu espectro. Muitas nebulosidades difusas da nossa galáxia mostram um espectro gasoso de linhas brilhantes. Outras, associadas a estrelas brilhantes, concordam com as estrelas envolvidas no espectro, e são bem explicadas como um efeito de reflexão ou ressonância. Tal explicação parece insustentável para a maioria das espirais.

A distribuição das espirais.— As espirais são encontradas em maior número precisamente onde as estrelas são menos numerosas (nos pólos galáticos), e não onde as estrelas são mais numerosas (no plano galáctico). Este fato torna difícil, se não impossível, encaixar as espirais em qualquer esquema coerente de evolução estelar, quer como ponto de origem, quer como produto evolutivo final. Até à data, ainda não foi encontrada nenhuma espiral efetivamente dentro da estrutura da Via Láctea.

Esta distribuição peculiar é reconhecidamente difícil de explicar em qualquer teoria. Este fator de distribuição nas duas teorias pode ser contrastado como se segue:

Como Universos Insulares

É muito improvável que a nossa galáxia esteja, por mero acaso, situada a meio caminho entre dois grandes grupos de universos-ilhas. Várias espirais de perfil mostram anéis periféricos de matéria oculta de forma que este anel escuro pode muito bem ser a regra e não a exceção. Se a nossa galáxia, ela própria uma espiral na teoria

do universo-ilha, possuir um tal anel periférico de matéria oculta, isso obliteraria as espirais distantes no nosso plano galáctico e explicaria a peculiar distribuição aparente das espirais. Há alguma evidência de tal matéria oculta na nossa galáxia. No que diz respeito ao excesso de velocidades de recessão observado, observações adicionais podem eliminar este fato. Parte do excesso pode muito bem ser devido ao movimento da nossa própria galáxia no espaço. A Nebulosa de Andrômeda está se aproximando de nós.

Como fenômenos galácticos

Se as espirais são objetos galácticos, devem ser uma classe à parte de todos os outros tipos conhecidos: porque nenhuma na nossa vizinhança? A sua aversão às regiões de maior densidade estelar só pode ser explicada na hipótese de que elas são, de alguma forma desconhecida, repelidas pelas estrelas. Não conhecemos nenhuma força adequada para produzir tal repulsão, exceto talvez a pressão da luz. Porque é que esta repulsão tem invariavelmente atuado essencialmente em ângulos retos em relação ao nosso plano galáctico? Porque é que alguns não foram repelidos na direção do nosso plano galáctico? A teoria da repulsão, é verdade, é apoiada pelo fato de que a maioria das espirais observadas até o momento estão se afastando de nós.

*As velocidades espaciais das espirais.—**Como Universos Insulares*

As espirais observadas até à data têm a enorme velocidade espacial média de 1200 km/s. Neste fator de velocidade, elas distinguem-se de todos os objetos galácticos. A sua velocidade espacial é cem vezes superior à das nebulosidades difusas galácticas, cerca de trinta vezes superior à velocidade média das estrelas, dez vezes superior à das nebulosas planetárias e cinco vezes superior à dos aglomerados. Velocidades tão elevadas parecem possíveis para galáxias individuais. A nossa própria galáxia tem provavelmente uma velocidade espacial, relativamente ao sistema das espirais, de várias centenas de km/seg. Foram feitas tentativas para derivar esta velocidade a partir das velocidades das espirais, mas ainda são incertas, pois só temos as velocidades radiais de trinta espirais.

Como fenômenos galácticos

Foram encontradas velocidades espaciais de várias centenas de km/seg. para algumas das estrelas mais fracas. Tem sido argumentado que uma extensão dos levantamentos de velocidade radial para as estrelas mais fracas possivelmente removeria a discrepância entre as velocidades das estrelas e as das espirais. Isto é possível, mas não parece provável. As estrelas fracas até agora selecionadas para investigação foram estrelas com movimentos próprios grandes conhecidos. São objetos excepcionais através deste método de seleção, não são objetos representativos. Velocidades espaciais elevadas são a regra, não a exceção, para as espirais. Velocidades espaciais elevadas continuam a ser a exceção, e não a regra, para as estrelas da nossa galáxia.

Movimentos próprios das espirais.— Se os resultados do próximo quarto de século mostrarem um acordo estreito entre diferentes observadores no sentido de que os movimentos anuais de translação ou rotação das espirais são iguais ou excedem 0",01 em valor médio, parece que a teoria do universo insular deve ser definitivamente abandonada.

Um movimento de 700 km/seg. através da nossa linha de visada produzirá os seguintes movimentos próprios anuais :

Distância anos-luz	10^3	10^4	10^5	10^6
Mov. prop. anual	",48	",048	",005	",0005

As observações visuais mais antigas das espirais têm um erro provável tão grande que são inúteis para a determinação de movimentos próprios, se forem pequenos; o intervalo de tempo disponível para determinações fotográficas é inferior a vinte e cinco anos.

O primeiro movimento próprio dado acima deveria inevitavelmente ter sido detectado por métodos visuais ou fotográficos, pelo que parece claro que as espirais não podem estar relativamente perto de nós nos pólos do nosso disco galáctico achatado. Tendo em conta o caráter nebuloso das condensações medidas, considero que a determinação fidedigna do segundo movimento próprio acima referido é impossível pelos métodos atuais sem um intervalo de tempo muito maior do que o atualmente disponível; para o terceiro e o quarto, precisaríamos de séculos.

Novas estrelas nas espirais.— Nos últimos anos, cerca de vinte e sete novas estrelas apareceram em espirais, dezesseis das quais na Nebulosa de Andrômeda, contra cerca de trinta e cinco que apareceram na nossa galáxia nos últimos três séculos. Tanto quanto se pode julgar a partir de objetos tão ténues, as novas em espirais têm uma história de vida semelhante à das novas galácticas, subitamente brilhando, e mais lentamente, mas ainda relativamente rápido, afundando-se novamente para uma luminosidade dez mil vezes menos intensa. Essas novas formam um forte argumento para a teoria do universo insular e fornecem, além disso, um método para determinar as distâncias aproximadas das espirais.

Com todos os seus elementos de simplicidade e continuidade, o nosso universo é demasiado aleatório nos seus detalhes para justificar deduções a partir de um número pequeno de objetos excepcionais. Quando não existe outra correlação disponível, tais deduções devem ser feitas com cautela e com uma apreciação completa das incertezas envolvidas.

Parece certo, por exemplo, que a dispersão das novas nas espirais, e provavelmente também na nossa galáxia, pode atingir pelo menos dez magnitudes absolutas, como é evidenciado por uma comparação de S Andromedae com as novas ténues encontradas recentemente nesta espiral. Uma divisão em duas classes de magnitude não é impossível.

A Nova de Tycho, para ser comparável em magnitude absoluta com algumas novas galácticas recentes, não podia estar a mais de dez anos-luz de distância. Se estivesse tão perto de nós quanto cem anos-luz, deveria ter tido uma magnitude absoluta de -8 no máximo; se estivesse apenas a mil anos-luz de distância, teria tido uma magnitude absoluta de -13 no máximo.

As distâncias e magnitudes absolutas de apenas quatro novas galácticas foram até agora determinadas; a magnitude absoluta média é -3 no máximo e +7 no mínimo.

Estes valores médios, embora se baseiem reconhecidamente numa quantidade muito limitada de dados, podem ser comparados com as novas mais fracas que apareceram na Nebulosa de Andrômeda, mais ou menos da seguinte forma: onde se assume 500.000 anos-luz para esta espiral na hipótese do universo insular e, para comparação,

a distância menor de 20.000 anos-luz.

		Magnitude aparente
	trinta novas galácticas	Dezesseis novas na Nebulosa Andromedae
no máximo	+5	+17 +27 (?; conjecturado pela analogia das novas galáctica)
no mínimo	+15 ±	

		Magnitude Absoluta	
	4 novas galácticas com dist. conhecida	Dezesseis novas em Andromeda, se (anos-luz) –	
		500.000	20.000
no máximo	-3	-4	+3
no mínimo	+7	+6?	+13?

Verificar-se-á do que precede que, à distância maior da teoria do universo insular, a concordância em magnitude absoluta é bastante boa para as novas galácticas e espirais. No entanto, se estiverem tão perto quanto 20.000 anos-luz, estas novas devem ser diferentes de objetos galácticos semelhantes, e de magnitude absoluta incomumente baixa no mínimo. Muito poucas estrelas foram até agora encontradas com uma luminosidade tão baixa como a magnitude absoluta +13, correspondendo, a esta distância, à magnitude aparente 27.

A hipótese simples de que as novas em espirais representam o deterioração de estrelas galácticas comuns pela nebulosidade em movimento rápido torna-se uma possibilidade nesta base de distância (i.e., 20.000 anos-luz), pois as espirais mais brilhantes estão dentro dos limites do sistema galáctico (Shapley).

Esta hipótese da origem das novas em espirais está sujeita a graves objeções. Ela envolve:

1. Que as estrelas assim consideradas (*thus overtaken*) são de menor luminosidade absoluta do que as mais fracas até agora observadas, com muito poucas exceções.
2. Que essas estrelas fracas são extraordinariamente numerosas, uma conclusão que está

em desacordo com os resultados das contagens de estrelas, que parecem indicar que há uma queda acentuada no número de estrelas abaixo da magnitude aparente 19 ou 20.

Como ilustração das dificuldades que acompanham uma tal hipótese, fiz uma contagem das estrelas em várias áreas em torno da Nebulosa de Andrômeda, incluindo, acredita-se, estrelas pelo menos tão fracas como a magnitude 19.5, e encontrei uma densidade de estrelas, incluindo todas as magnitudes, de cerca de 6.000 estrelas por grau quadrado.

Se não estiver a mais de 20.000 anos-luz de distância, esta espiral situar-se-á a 7.000 anos-luz do plano da Via Láctea e, se se mover a uma velocidade de 300 km/s, percorrerá 385 anos-luz cúbicos por ano.

Para tornar o caso tão favorável quanto possível para a hipótese sugerida, suponhamos que nenhuma das 6.000 estrelas por grau quadrado está tão perto quanto 15.000 anos-luz, mas que todas estão dispostas num estrato que se estende 5.000 anos-luz para cada lado da espiral.

Então a Nebulosa de Andrômeda deveria encontrar uma destas estrelas a cada 520 anos. Assim, a taxa real a que as novas foram encontradas nesta espiral indicaria uma densidade estelar cerca de duas mil vezes maior do que a indicada pela contagem; cada estrela ocuparia cerca de um segundo de arco quadrado na chapa fotográfica.

As espirais como universos insulares: resumo.—

1. Nesta teoria evitamos as dificuldades quase insuperáveis envolvidas numa tentativa de encaixar as espirais em qualquer esquema coerente de evolução estelar, quer como um ponto de origem, quer como um produto evolutivo.
2. Nesta teoria é desnecessário tentar coordenar as enormes velocidades espaciais das espirais com as da estrela média.
3. O espectro das espirais é tal como seria de esperar de uma galáxia de estrelas.
4. Uma estrutura espiral foi sugerida para a nossa própria galáxia, e não é improvável.

5. Se forem universos insulares, as novas estrelas observadas nas espirais parecem ser uma consequência natural da sua natureza como galáxias. As correlações entre as novas nas espirais e aquelas da nossa galáxia indicam distâncias que vão desde talvez 500.000 anos-luz, no caso da Nebulosa de Andrômeda, até 10.000.000 ou mais anos-luz, no caso das espirais mais remotas.

6. A tais distâncias, estes universos-ilha seriam da mesma ordem de grandeza da nossa própria galáxia.

7. Muitas espirais mostram evidências de anéis periféricos de matéria oculta nos seus planos equatoriais. Um tal fenômeno na nossa galáxia, considerada como uma espiral, serviria para obliterar as espirais distantes no nosso plano galático e forneceria uma explicação adequada para a distribuição inexplicável das espirais.

Há uma unidade e um acordo interno nas características da teoria do universo insular que me

atrai fortemente. A prova relativa às dimensões da galáxia, de ambos os lados, é demasiada incerta como está para permitir qualquer pronunciamento dogmático. Há muitos pontos de dificuldade em ambas teorias das dimensões galácticas, e é sem dúvida verdade que muitos preferirão não julgar até que surjam muitas provas adicionais. No entanto, até que estejam disponíveis provas mais definitivas em contrário, sinto que a evidência para as dimensões galácticas menores e comumente aceitas é ainda a mais forte; e que o diâmetro postulado de 300.000 anos-luz deve certamente ser dividido por cinco, e talvez por dez.

Mantendo, portanto, a convicção de que a galáxia não tem provavelmente mais de 30.000 anos-luz de diâmetro; que as espirais não são objetos intragalácticos mas universos insulares, como a nossa própria galáxia, e que as espirais, como galáxias exteriores, nos indicam um universo maior no qual podemos penetrar a distâncias de dez milhões a cem milhões de anos-luz.

A relação velocidade-distância para as galáxias estabelecida por Edwin Hubble

Daniel Iria Machado

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Resumo

A relação linear entre as velocidades de recessão das galáxias e suas distâncias ou, de modo equivalente, entre os desvios para o vermelho nos espectros das galáxias e suas distâncias, atualmente denominada lei de Hubble-Lemaître, é um resultado fundamental na área da Cosmologia, que pode ser entendido, de acordo com o modelo cosmológico padrão, como consequência de um Universo em expansão. Em um trabalho pioneiro publicado em 1929, Edwin Hubble (1889-1953) forneceu evidências consistentes da validade desta lei, com base em dados observacionais. Apresenta-se aqui uma tradução do inglês para o português deste influente artigo.

Abstract

The linear relation between the recession velocities of galaxies and their distances or, equivalently, between the redshifts in the spectra of galaxies and their distances, currently known as the Hubble-Lemaître law, is a fundamental result in the area of Cosmology, which can be understood, according to the standard cosmological model, as a consequence of an expanding Universe. In a pioneering work published in 1929, Edwin Hubble (1889-1953) provided consistent evidence for the validity of this law, based on observational data. An English to Portuguese translation of this influential article is presented here.

Palavras-chave: lei de Hubble-Lemaître, constante de Hubble, história da cosmologia.

Keywords: Hubble-Lemaître law, Hubble constant, history of cosmology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43115](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43115)

1 Introdução

O astrônomo estadunidense Edwin P. Hubble (1889-1953) tornou-se renomado por suas investigações no campo da Astronomia Extragaláctica. A partir de 1919, ele passou a atuar no Observatório de Monte Wilson, na Califórnia, onde teve acesso ao poderoso telescópio Hooker, com diâmetro de 100 polegadas (2,5 m), o maior em operação na época, que o permitiu avançar no estudo das propriedades das galáxias [1].

Um primeiro resultado notável obtido por Hubble relaciona-se à determinação das distâncias das galáxias. Observando estrelas cefeadas na então chamada Nebulosa de Andrômeda (M31), Hubble pôde estabelecer o quanto afastado este objeto se encontrava, utilizando a relação período-luminosidade descoberta por Henrietta Leavitt (1868-1921) e calibrada por Harlow Shapley (1885-1972) [2-4]. Este trabalho, divulgado no final de dezembro de 1924, mostrou que An-

drômeda situava-se além da Via Láctea e foi decisivo para encerrar o debate existente sobre a natureza das estruturas conhecidas como nebulosas espirais, que passaram a ser consideradas galáxias independentes pela maioria dos astrônomos, e não parte de nossa própria galáxia [1].

Neste período, chamavam a atenção as pesquisas realizadas pelo astrônomo estadunidense Vesto Slipher (1875-1969), sobre os espectros da luz das galáxias. Trabalhando no Observatório Lowell em Flagstaff, no Arizona, Slipher reuniu, entre 1912 e 1925, dados sobre 45 galáxias, das quais 41 delas apresentavam um espectro com desvio para o vermelho (*redshifts*), ou seja, mostravam linhas espectrais deslocadas para a região de comprimentos de ondas maiores, quando comparadas com linhas correspondentes do espectro de fontes estacionárias. Se isto fosse tratado como decorrente do efeito Doppler, implicaria um movimento de afastamento destas galáxias em relação à Terra [4].

O valor do *redshift* (z) pode ser definido por $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, onde λ é o comprimento de onda observado de determinada linha do espectro eletromagnético de uma fonte que se afasta do observador e λ_0 é o comprimento de onda da linha equivalente do espectro de uma fonte em repouso no laboratório. No efeito Doppler, se uma fonte se afasta com velocidade baixa em comparação com a velocidade da luz no vácuo (c), a componente da velocidade na direção de observação, ou seja, a velocidade radial (v), é dada por $v = c z$ [5].

Prosseguindo em suas pesquisas sobre objetos extragaláticos, Hubble ocupou-se também da análise da relação entre as velocidades de recessão das galáxias, inferidas a partir das medidas do *redshift* em seus espectros, e suas distâncias. Dispondo de medidas, por ele consideradas razoáveis, das velocidades radiais e distâncias de 24 galáxias, constatou existir uma relação aproximadamente linear entre estas grandezas, publicando suas conclusões no início de 1929. Isto significava que havia também uma relação linear entre os *redshifts* e as distâncias das galáxias [4, 6].

Com a ampliação da base de dados, a relação linear entre velocidades de recessão e distâncias das galáxias ou, de modo equivalente, entre *redshifts* e distâncias, tornou-se firmemente estabelecida e passou, com o tempo, a ser conhecida como lei de Hubble [4]. Tal relação foi bem verificada empiricamente para $v < 30.000$ km/s ($z < 0,1$) [7]. Atualmente, esta lei é comumente escrita na forma $v = H_0 d$, onde v é a velocidade de recessão da galáxia, d sua distância e H_0 é denominada constante de Hubble. De acordo com o modelo de evolução do Universo mais popular, a cosmologia do *big bang*, tal relação fornece suporte observational para a concepção de que o Universo está em expansão e H_0 informa a taxa com a qual isto ocorre atualmente [8].

No entanto, quando Hubble anunciou os resultados que havia obtido, não estava claro para os pesquisadores se o Universo era estático ou estava em expansão. A maioria dos astrônomos aceitou a validade da relação linear encontrada por Hubble entre velocidades de recessão e distâncias das galáxias, porém a interpretação desta como evidência de que o Universo estava em expansão desenvolveu-se mais gradualmente [4].

A relação velocidade-distância estabelecida empiricamente por Hubble, em conjunto com con-

siderações teóricas, fez com que, por volta de 1933, a maior parte dos cosmólogos admitisse a ideia de que o Universo estava em expansão [4].

Quando Hubble divulgou sua descoberta, não estava ciente do trabalho do cosmólogo belga Georges Lemaître (1894-1966), que em 1927 havia publicado um artigo em um periódico pouco conhecido, no qual expunha sua teoria de um Universo em expansão, fundamentada na Relatividade Geral de Albert Einstein (1879-1955). Lemaître argumentou que o movimento de afastamento das galáxias era um efeito cosmológico devido à expansão do espaço, derivou teoricamente uma relação linear entre as velocidades e as distâncias das galáxias, e estimou o valor da constante de proporcionalidade (H_0 na terminologia atual) com base nos dados observacionais então disponíveis [4, 9].

O reconhecimento das contribuições de Lemaître fez a União Astronômica Internacional recomendar, em 2018, que a relação velocidade-distância fosse designada lei de Hubble-Lemaître [10].

A lei de Hubble-Lemaître viabilizou o desenvolvimento de diversas áreas de pesquisa, ao facilitar a determinação das distâncias de galáxias e quasares, a partir das medidas de *redshifts* e das correspondentes velocidades de recessão. O conhecimento das distâncias de mais de um milhão de galáxias e quasares tornou possível, por exemplo, estabelecer a localização e a distribuição tridimensional destes objetos, revelando a estrutura em larga escala do Universo, com uma rede interconectada de galáxias, aglomerados de galáxias, filamentos e vazios [11].

A constante de Hubble (H_0), por sua vez, está presente também nos cálculos para a determinação de várias grandezas cosmológicas, dentre as quais a idade do Universo e o tamanho do Universo observável. Isto motivou a condução de investigações para a medição de H_0 com precisão crescente [12, 13].

O trabalho publicado por Hubble em 1929 contendo a relação velocidade-distância para as galáxias é considerado um marco na Cosmologia. A tradução do inglês para o português deste célebre artigo será apresentada a seguir. No artigo original, as referências são apresentadas com algarismos arábicos em sobreescrito. No entanto, esta tradução apresenta as referências no método

numérico tradicional dos *Cadernos de Astronomia*, além de fornecê-las de forma mais completa, incluindo autor, título e *link* para acesso *online*.

Sobre o tradutor

Daniel Iria Machado (imachadodaniel23@gmail.com) é Bacharel em Física, Mestre em Educação e Doutor em Educação para a Ciência. É professor da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) no campus de Foz do Iguaçu. Atua na área da Educação em Ciências, com foco principal no campo da Educação em Astronomia. Desenvolve projetos de extensão dedicados ao ensino e à divulgação da Astronomia. Participou de pesquisas em Astronomia observando oculações estelares, fenômenos mútuos das luas galileanas de Júpiter e aproximações mútuas desses satélites.

Referências

- [1] G. J. Whitrow, *Dicionário de biografias científicas* (Contraponto, Rio de Janeiro, 2007).
- [2] H. S. Leavitt e E. C. Pickering, *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*, HCOC **173**(1) (1912). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L>, acesso em jan. 2024.
- [3] D. Iria Machado, *As estrelas Cefeidas enquanto velas-padrão: A relação período-luminosidade tal qual apresentada por sua descobridora*, *Cadernos de Astronomia* **2**(2), 170 (2021).
- [4] H. S. Kragh, *Conceptions of Cosmos: From Myths to the Accelerating Universe: A History* (Oxford University Press, Oxford, 2007).
- [5] B. W. Carroll e D. A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics* (Pearson Addison-Wesley, Boston, 2007).
- [6] E. Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, PNAS **15**(3), 168 (1929).
- [7] G. Paturel, P. Teerikorpi e Y. Baryshev, *Hubble Law: Measure and Interpretation*, Found Phys. **47**(9), 1208 (2017). [ArXiv:1801.00128](https://arxiv.org/abs/1801.00128).
- [8] A. Liddle, *An Introduction to Modern Cosmology* (Wiley, Chichester, 2015), 3^a ed.
- [9] G. Lemaître, *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*, Ann. Soc. Sci. Bruxelles **A47**(49) (1927). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1927ASSB...47...49L/abstract>, acesso em jan. 2024.
- [10] E. Gibney, *Belgian priest recognized in Hubble-law name change*, Nature - News, 30 out. (2018).
- [11] N. A. Bahcall, *Hubble's law and the expanding universe*, PNAS **112**(11), 3173 (2015).
- [12] W. L. Freedman et al., *Final results from the Hubble Space Telescope key project to measure the Hubble constant*, ApJ **553**(1), 47 (2001). [ArXiv:astro-ph/0012376](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0012376).
- [13] W. L. Freedman, *Measurements of the Hubble constant: tensions in perspective*, ApJ **919**(1), 16 (2021).

Uma Relação entre Distância e Velocidade Radial entre Nebulosas Extragalácticas

Edwin Hubble

Observatório de Monte Wilson, Instituto Carnegie de Washington

Comunicado em 17 de janeiro de 1929

Determinações do movimento do Sol em relação às nebulosas extragalácticas¹ envolveram um termo K de várias centenas de quilômetros que parece ser variável.² Explicações deste paradoxo foram buscadas em uma correlação entre velocidades radiais aparentes³ e distâncias, porém até agora os resultados não foram convincentes. O presente artigo é um reexame da questão, baseado apenas naquelas distâncias nebulares que se acredita serem razoavelmente confiáveis.

As distâncias das nebulosas extragalácticas dependem, em última análise, da aplicação de critérios de luminosidade absoluta às estrelas envolvidas cujos tipos podem ser reconhecidos. Estes incluem, entre outros, variáveis cefeidas, novas e estrelas azuis envolvidas em nebulosidade de emissão. Os valores numéricos dependem do ponto zero da relação período-luminosidade entre as cefeidas, os outros critérios apenas verificam a ordem das distâncias.⁴ Este método está restrito às poucas nebulosas que são bem resolvidas pelos instrumentos existentes. Um estudo dessas nebulosas, juntamente com aquelas nas quais alguma estrela pode ser reconhecida, indica a probabilidade de um limite superior aproximadamente uniforme para a luminosidade absoluta das estrelas, pelo menos nas espirais de tipo tardio e nas nebulosas irregulares, da ordem de M (fotográfica) = -6,3 [1]. As luminosidades aparentes das estrelas mais brilhantes em tais nebulosas são, portanto, critérios que, embora imperfeitos e de aplicação cautelosa, fornecem estimativas razoáveis das distâncias de todos os sistemas extragaláticos nos quais ao menos algumas estrelas podem ser detectadas.⁵

¹[N.T.]: O que atualmente denominamos “galáxia” era referido como “nebulosa extragaláctica” por Hubble, ou simplesmente “nebulosa”, quando o contexto deixa claro se tratar de um objeto extragaláctico.

²[N.T.]: Conforme Hubble explica em seu livro *The realm of the nebulae*, publicado em 1936, assumia-se que a Via Láctea estaria se movimentando rapidamente em relação às galáxias, transportando consigo o Sol. O movimento solar seria então uma combinação do movimento do Sol no interior da Via Láctea e do movimento desta em relação às galáxias. Supunha-se inicialmente que as galáxias estariam se deslocando com velocidades similares em direções aleatórias. O movimento individual de uma galáxia no referencial das galáxias (movimento peculiar), combinado com o movimento do sistema de referência das galáxias em relação ao Sol (reflexo do movimento solar), levaria à velocidade observada da galáxia em relação ao Sol. Ao se observar um conjunto suficientemente grande de galáxias, os movimentos peculiares, ocorrendo de modo aleatório, tenderiam a se cancelar, restando apenas o reflexo do movimento solar. Esperava-se que, ao se eliminar o movimento solar, velocidades de aproximação fossem tão numerosas quanto de afastamento. Entretanto, os dados indicavam existir, além do movimento solar, um movimento sistemático de recessão das galáxias. Tal situação motivou o astrônomo alemão Carl Wirtz (1876-1939), em 1918, a introduzir um termo K constante a ser subtraído das velocidades observadas das galáxias, antes de se determinar o movimento solar. Análises adicionais indicavam que o termo K poderia ser variável, dependendo da distância a que uma galáxia se encontrava.

³[N.T.]: Hubble se refere aqui a velocidades radiais “aparentes”, pois, como esclarece na obra *The realm of the nebulae*, pensava ser necessário reunir mais evidências para que os *redshifts* constatados nos espectros das galáxias pudessem ser interpretados, com segurança, como sendo consequência do movimento de afastamento destes objetos. Embora considerasse essa interpretação plausível, ele não havia descartado a possibilidade de os *redshifts* observados serem decorrentes de um princípio físico ainda desconhecido.

⁴[N.T.]: Devido a um erro na calibração da relação período-luminosidade utilizada por Hubble, as distâncias estimadas por ele com base no estudo das estrelas cefeidas são inferiores aos valores atualmente aceitos. Por exemplo, a distância até a galáxia de Andrômeda encontrada por Hubble foi de cerca de 900 mil anos-luz, enquanto o valor adotado nos dias de hoje é de aproximadamente 2,5 milhões de anos-luz.

⁵[N.T.]: Na terminologia astronômica atual, o brilho intrínseco (ou absoluto) de uma estrela está associado à sua

Tabela 1: NEBULOSAS CUJAS DISTÂNCIAS FORAM ESTIMADAS A PARTIR DE ESTRELAS ENVOLVIDAS OU A PARTIR DAS LUMINOSIDADES MÉDIAS EM UM AGLOMERADO.

OBJETO	m_s	r	v	m_t	M_t^6
P. N. Mag. ⁷	...	0,032	+170	1,5	-16,0
G. N. Mag. ⁸	...	0,034	+290	0,5	17,2
N. G. C. 6822	...	0,214	-130	9,0	12,7
598	...	0,263	-70	7,0	15,1
221	...	0,275	-185	8,8	13,4
224	...	0,275	-220	5,0	17,2
5457	17,0	0,45	+200	9,9	13,3
4736	17,3	0,5	+290	8,4	15,1
5194	17,3	0,5	+270	7,4	16,1
4449	17,8	0,63	+200	9,5	14,5
4214	18,3	0,8	+300	11,3	13,2
3031	18,5	0,9	-30	8,3	16,4
3627	18,5	0,9	+650	9,1	15,7
4826	18,5	0,9	+150	9,0	15,7
5236	18,5	0,9	+500	10,4	14,4
1068	18,7	1,0	+920	9,1	15,9
5055	19,0	1,1	+450	9,6	15,6
7331	19,0	1,1	+500	10,4	14,8
4258	19,5	1,4	+500	8,7	17,0
4151	20,0	1,7	+960	12,0	14,2
4382	...	2,0	+500	10,0	16,5
4472	...	2,0	+850	8,8	17,7
4486	...	2,0	+800	9,7	16,8
4649	...	2,0	+1090	9,5	17,0
Média					-15,5

m_s = magnitude fotográfica das estrelas mais brilhantes envolvidas.

r = distância em unidades de 10^6 parsecs. As duas primeiras são valores de Shapley.

v = velocidades medidas em km/s.⁹ N. G. C. 6822, 221, 224 e 5457 são determinações recentes de Humason.¹⁰

luminosidade (L), que corresponde à energia total emitida pela fonte a cada segundo. O brilho aparente, conforme visto da Terra, está relacionado ao fluxo radiante (F). Se a estrela se encontra a uma distância r do observador, tem-se $F = L/4\pi r^2$, supondo-se que a luz se propaga sem ser absorvida ou espalhada. No sistema de medição de brilho tradicional utilizado na Astronomia, define-se a magnitude aparente (m) de uma estrela de tal modo que quanto maior o brilho aparente, menor a magnitude. Na escala de magnitudes, uma estrela de magnitude aparente m é 100 vezes mais brilhante que uma estrela de magnitude aparente $m + 5$. As magnitudes aparentes m_1 e m_2 de duas estrelas com fluxos radiantes F_1 e F_2 , respectivamente, podem ser relacionadas pela expressão $F_2/F_1 = 10^{(m_1-m_2)/5}$. Sirius, a estrela mais brilhante do céu noturno, por exemplo, possui magnitude aparente visual de -1,44. Define-se também a magnitude absoluta (M) de uma estrela como a magnitude aparente que ela teria se estivesse a uma distância de 10 parsecs da Terra. As magnitudes absolutas M_1 e M_2 de duas estrelas com luminosidades L_1 e L_2 , respectivamente, podem ser relacionadas pela equação $L_2/L_1 = 10^{(M_1-M_2)/5}$. A magnitude absoluta visual de Sirius, por exemplo, é de +1,45. Medindo-se m e conhecendo-se M , é possível determinar a distância r de uma estrela (em parsecs) pela expressão $m - M = 5\log_{10}(r/10)$, na qual $m - M$ é o chamado módulo de distância.

⁶[N.T.]: As magnitudes absolutas visuais totais indicadas nesta coluna são todas negativas, embora só tenha sido incluído explicitamente o sinal negativo para o primeiro objeto e o valor médio da grandeza.

⁷[N.T.]: Pequena Nuvem de Magalhães.

⁸[N.T.]: Grande Nuvem de Magalhães.

⁹[N.T.]: Estas são velocidades radiais heliocêntricas, ou seja, medidas na direção de observação de cada galáxia e expressadas em relação ao Sol, após correções realizadas para se levar em conta o movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo (com velocidade da ordem de 0,5 km/s) e o movimento orbital da Terra ao redor do Sol (com velocidade de cerca de 30 km/s).

¹⁰[N.T.]: A maior parte das velocidades radiais utilizadas por Hubble neste artigo foi obtida do trabalho pioneiro de Vesto Slipher. Uma lista de objetos astronômicos com velocidades radiais determinadas por Slipher e outros pesquisadores

m_t = magnitude visual de Holetschek tal como corrigida por Hopmann. Os três primeiros objetos não foram medidos por Holetschek, e os valores de m_t representam estimativas do autor com base nos dados disponíveis.

M_t = magnitude absoluta visual total calculada a partir de m_t e r .¹¹

Finalmente, as próprias nebulosas parecem ser de uma ordem definida de luminosidade absoluta, exibindo uma amplitude de quatro ou cinco magnitudes em torno de um valor médio $M(\text{visual}) = -15,2$ [1]. A aplicação desta média estatística a casos individuais raramente pode ser explorada com proveito, porém onde números consideráveis estão envolvidos, e especialmente nos diversos aglomerados de nebulosas, luminosidades aparentes médias das próprias nebulosas oferecem estimativas confiáveis das distâncias médias.

Velocidades radiais de 46 nebulosas extragalácticas estão agora disponíveis, mas distâncias individuais foram estimadas para apenas 24. Para uma outra, N. G. C. 3521, uma estimativa provavelmente poderia ser feita, porém não há fotografias disponíveis em Monte Wilson. Os dados são fornecidos na tabela 1. As sete primeiras distâncias são as mais confiáveis, fiando-se, exceto para M32,¹² a companheira de M31,¹³ em extensas investigações de muitas estrelas envolvidas. As treze distâncias seguintes, dependentes do critério de um limite superior uniforme de luminosidade estelar, estão sujeitas a erros prováveis consideráveis, mas julga-se que são os valores mais razoáveis disponíveis atualmente. Os quatro últimos objetos parecem estar no Aglomerado da Virgem. A distância atribuída ao aglomerado, 2×10^6 parsecs, é derivada da distribuição de luminosidades nebulares, juntamente com as luminosidades de estrelas em algumas das espirais de tipo tardio, e difere um pouco da estimativa de Harvard de dez milhões de anos-luz [2].¹⁴

Os dados na tabela indicam uma correlação linear entre distâncias e velocidades, quer as últimas sejam usadas diretamente ou corrigidas quanto ao movimento solar, de acordo com as soluções mais antigas. Isso sugere uma nova solução para o movimento solar na qual as distâncias são introduzidas como coeficientes do termo K , isto é, assume-se que as velocidades variam diretamente com as distâncias e, portanto, K representa a velocidade à distância unitária devido a esse efeito.¹⁵ As equações de condição então assumem a forma¹⁶

$$r K + X \cos \alpha \cos \delta + Y \sin \alpha \cos \delta + Z \sin \delta = v$$

foi fornecida por Gustaf Strömgren (1882-1962) no artigo *Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae*, publicado em 1925, no volume 61 do *Astrophysical Journal*.

¹¹[N.T.]: O valor de M_t pode ser calculado pela expressão $m_t - M_t = 5\log_{10}(r/10)$, com r em parsecs.

¹²[N.T.]: A galáxia NGC 221 também é catalogada como M32.

¹³[N.T.]: M31 ou NGC 224 são designações da Galáxia de Andrômeda.

¹⁴[N.T.]: Visto que 1 parsec equivale a aproximadamente 3,26 anos-luz, a estimativa de Harvard para a distância do Aglomerado da Virgem era de cerca de 3×10^6 parsecs.

¹⁵[N.T.]: Este termo K corresponde ao que atualmente se chama constante de Hubble, designada por H_0 .

¹⁶[N.T.]: Nestas equações, α e δ correspondem, respectivamente, à ascensão reta e à declinação de uma galáxia, no sistema equatorial de coordenadas celestes. Os parâmetros X , Y e Z representam as componentes escalares da velocidade $\vec{v}_{R\odot}$ do sistema de referência das galáxias em relação ao Sol, expressadas em coordenadas retangulares no sistema equatorial heliocêntrico. A velocidade $\vec{v}_{R\odot}$ do Sol em relação ao sistema de referência das galáxias é o simétrico de $\vec{v}_{R\odot}$, com componentes escalares $X_\odot = -X$, $Y_\odot = -Y$ e $Z_\odot = -Z$. O termo $X \cos \alpha \cos \delta + Y \sin \alpha \cos \delta + Z \sin \delta$ corresponde à projeção de $\vec{v}_{R\odot}$ na direção de observação de uma galáxia. Se este termo for denominado v_s , as equações de condição podem ser escritas na forma $v = v_s + Kr$, indicando que a velocidade radial de uma galáxia medida em relação ao Sol (v) é uma combinação da projeção, na direção radial, da velocidade do sistema de referência das galáxias em relação ao Sol (v_s) e da velocidade radial da galáxia verificada no sistema de referência das galáxias (Kr). O método utilizado por Hubble para estabelecer as equações de condição é discutido por Domingos Soares e Luiz Paulo R. Vaz no artigo *Solar-motion correction in early extragalactic astrophysics*, publicado em junho de 2014 no *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, volume 108, número 3.

Duas soluções foram produzidas,¹⁷ uma usando as 24 nebulosas individualmente, a outra combinando-as em 9 grupos de acordo com a proximidade em direção e em distância. Os resultados são¹⁸

	24 OBJETOS	9 GRUPOS
X	-65 ± 50	$+3 \pm 70$
Y	$+226 \pm 95$	$+230 \pm 120$
Z	-195 ± 40	-133 ± 70
K	$+465 \pm 50$	$+513 \pm 60$ km/s por 10^6 parsecs
A	286°	269°
D	$+40^\circ$	$+33^\circ$
V_0	306 km/s	247 km/s

Para um material tão escasso, tão mal distribuído, os resultados são razoavelmente definidos. As diferenças entre as duas soluções devem-se, em grande parte, às quatro nebulosas da Virgem, que, sendo os objetos mais distantes e todos compartilhando o movimento peculiar do aglomerado, influenciam indevidamente o valor de K e, por isso, de V_0 . Novos dados sobre objetos mais distantes serão necessários para reduzir o efeito de tal movimento peculiar. Enquanto isso, números arredondados, intermediários entre as duas soluções, representarão a ordem provável dos valores. Por exemplo, permita que $A = 277^\circ$, $D = +36^\circ$ (Long. gal.¹⁹ = 32° , lat. gal.²⁰ = $+18^\circ$), $V_0 = 280$ km/s, $K = 500$ km/s por milhão de parsecs.²¹ O Sr. Strömgberg muito gentilmente verificou a ordem geral destes valores por meio de soluções independentes para diferentes agrupamentos dos dados.

Descobriu-se que um termo constante, introduzido nas equações, é pequeno e negativo. Isso parece remover a necessidade do antigo termo K constante. Soluções desse tipo foram publicadas por Lundmark [3], que substituiu o antigo K por $k + lr + mr^2$. Sua solução preferida produziu $k = 513$, em comparação com o valor anterior da ordem de 700 e, portanto, ofereceu pouca vantagem.

Os resíduos para as duas soluções dadas acima perfazem a média de 150 e 110 km/s e devem representar os movimentos peculiares médios das nebulosas individuais e dos grupos, respectivamente. Para exibir os resultados de maneira gráfica, o movimento solar foi eliminado das velocidades observadas e os restos, os termos de distância mais os resíduos, foram plotados contra as distâncias.²² A disposição dos resíduos é quase tão regular quanto se pode esperar e, em geral, a forma das soluções parece ser adequada.

As 22 nebulosas para as quais as distâncias não estão disponíveis podem ser tratadas de dois modos. Em primeiro lugar, a distância média do grupo derivada das magnitudes aparentes médias pode ser comparada com a média das velocidades corrigidas quanto ao movimento solar. O resultado, 745 km/s para uma distância de $1,4 \times 10^6$ parsecs, situa-se entre as duas soluções anteriores e indica um valor para K de 530 em comparação com o valor proposto, 500 km/s.

¹⁷[N.T.]: A solução pode ser obtida por meio do método dos mínimos quadrados.

¹⁸[N.T.]: Nos resultados apresentados, A e D representam a ascensão reta e a declinação, respectivamente, do ponto da esfera celeste para onde o Sol se dirige em seu movimento analisado em relação às galáxias, e V_0 corresponde ao módulo da velocidade do Sol em relação ao sistema de referência das galáxias. Estas grandezas podem ser calculadas pelas seguintes expressões: $A = \arctan(Y_\odot/X_\odot)$, $D = \arctan[Z_\odot/(X_\odot^2 + Y_\odot^2)^{1/2}]$ e $V_0 = (X_\odot^2 + Y_\odot^2 + Z_\odot^2)^{1/2}$.

¹⁹[N.T.]: Longitude galáctica.

²⁰[N.T.]: Latitude galáctica.

²¹[N.T.]: Este valor de K é cerca de sete vezes superior às medidas mais precisas da constante de Hubble disponíveis atualmente, compreendidas entre 67 e 74 km/s por megaparsec, dependendo do método utilizado. Este intervalo de valores foi apresentado por Wendy L. Freedman no artigo *Measurements of the Hubble constant: tensions in perspective*, publicado em setembro de 2021 no *Astrophysical Journal*, volume 919, número 1.

²²[N.T.]: A eliminação do movimento solar das velocidades radiais observadas das galáxias (v) pode ser feita subtraindo-se de v o termo $v_s = X \cos \alpha \cos \delta + Y \sin \alpha \cos \delta + Z \sin \delta$. As velocidades radiais corrigidas quanto ao movimento solar (v_c) são dadas então por $v_c = v - v_s$. No gráfico apresentado na Figura 1, plotou-se v_c em função da distância (r).

Tabela 2: NEBULOSAS CUJAS DISTÂNCIAS SÃO ESTIMADAS A PARTIR DE VELOCIDADES RADIAIS

OBJETO	v	v_s^{23}	r^{24}	m_t	M_t^{25}
N. G. C 278	+ 650	-110	1,52	12,0	-13,9
404	- 25	- 65	. .	11,1	. .
584	+1800	+ 75	3,45	10,9	16,8
936	+1300	+115	2,37	11,1	15,7
1023	+ 300	- 10	0,62	10,2	13,8
1700	+ 800	+220	1,16	12,5	12,8
2681	+ 700	- 10	1,42	10,7	15,0
2683	+ 400	+ 65	0,67	9,9	14,3
2841	+ 600	- 20	1,24	9,4	16,1
3034	+ 290	-105	0,79	9,0	15,5
3115	+ 600	+105	1,00	9,5	15,5
3368	+ 940	+ 70	1,74	10,0	16,2
3379	+ 810	+ 65	1,49	9,4	16,4
3489	+ 600	+ 50	1,10	11,2	14,0
3521	+ 730	+ 95	1,27	10,1	15,4
3623	+ 800	+ 35	1,53	9,9	16,0
4111	+ 800	- 95	1,79	10,1	16,1
4526	+ 580	- 20	1,20	11,1	14,3
4565	+1100	- 75	2,35	11,0	15,9
4594	+1140	+ 25	2,23	9,1	17,6
5005	+ 900	-130	2,06	11,1	15,5
5866	+ 650	-215	1,73	11,7	-14,5
Média				10,5	-15,3

Em segundo lugar, a dispersão das nebulosas individuais pode ser examinada assumindo-se a relação entre distâncias e velocidades tal como determinada anteriormente. Distâncias podem então ser calculadas a partir das velocidades corrigidas quanto ao movimento solar, e magnitudes absolutas podem ser derivadas das magnitudes aparentes. Os resultados são dados na tabela 2 e podem ser comparados com a distribuição de magnitudes absolutas entre as nebulosas na tabela 1, cujas distâncias são derivadas a partir de outros critérios. N. G. C. 404 pode ser excluída, pois a velocidade observada é tão pequena que o movimento peculiar deve ser grande em comparação com o efeito da distância. No entanto, o objeto não é necessariamente uma exceção, visto que uma distância pode ser atribuída para a qual o movimento peculiar e a magnitude absoluta estejam ambos dentro do intervalo previamente determinado. As duas magnitudes médias, -15,3 e -15,5, as amplitudes, 4,9 e 5,0 mag., e as distribuições de frequência são estritamente semelhantes para esses dois conjuntos de dados inteiramente independentes; e mesmo a ligeira diferença nas magnitudes médias pode ser atribuída às nebulosas selecionadas, muito brilhantes, no Aglomerado da Virgem. Essa concordância inteiramente natural corrobora a validade da relação velocidade-distância em um caso muito evidente. Por fim, vale registrar que a distribuição de frequência de magnitudes absolutas nas duas tabelas combinadas é comparável àquelas encontradas nos diversos aglomerados de nebulosas.

Os resultados estabelecem uma relação aproximadamente linear entre velocidades e distâncias entre nebulosas para as quais velocidades foram publicadas anteriormente; e a relação parece dominar a distribuição de velocidades. A fim de investigar o assunto em uma escala muito maior, o Sr. Humason,

²³[N.T.]: v_s corresponde à projeção, na direção de observação de uma galáxia, da velocidade $\vec{v}_{R\odot}$ do sistema de referência das galáxias em relação ao Sol.

²⁴[N.T.]: A distância r de uma galáxia pode ser estimada a partir da expressão $r K + v_s = v$, adotando-se $K = 500$ km/s por megaparsec.

²⁵[N.T.]: As magnitudes absolutas visuais totais indicadas nesta coluna são todas negativas, embora só tenha sido incluído explicitamente o sinal negativo para a primeira e a última galáxia, bem como para o valor médio da grandeza.

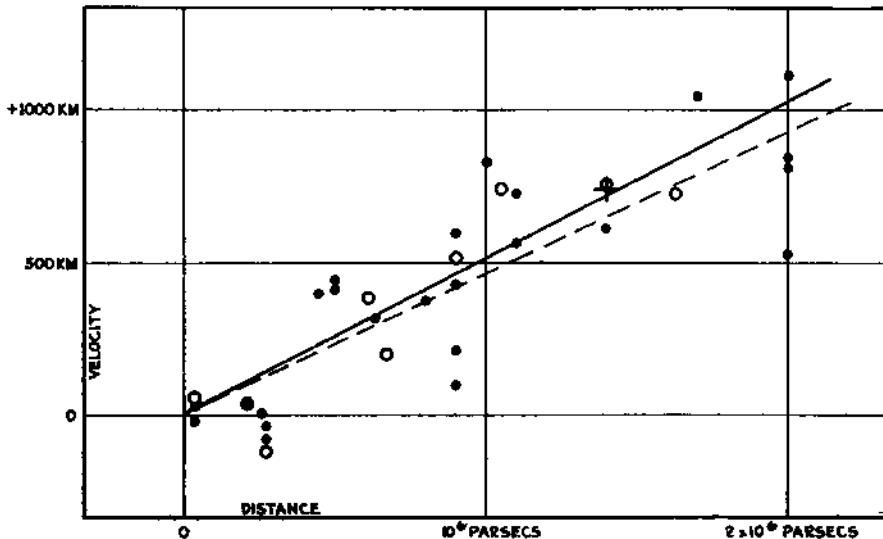


Figura 1

Relação Velocidade-Distância entre Nebulosas Extragalácticas.

As velocidades radiais,²⁶ corrigidas quanto ao movimento solar, foram plotadas contra as distâncias estimadas a partir das estrelas envolvidas e das luminosidades médias de nebulosas em um aglomerado. Os discos pretos e a linha cheia representam a solução para o movimento solar usando as nebulosas individualmente; os círculos e a linha tracejada representam a solução combinando as nebulosas em grupos;²⁷ a cruz representa a velocidade média correspondente à distância média de 22 nebulosas cujas distâncias não puderam ser estimadas individualmente.

em Monte Wilson, iniciou um programa de determinação de velocidades das nebulosas mais distantes que podem ser observadas com confiança. Estas, naturalmente, são as nebulosas mais brilhantes em aglomerados de nebulosas. O primeiro resultado definido [4], $v = 3779 \text{ km/s}$ para N. G. C. 7619, é totalmente consistente com as presentes conclusões. Corrigida quanto ao movimento solar, esta velocidade vale $+3910$, a qual, com $K = 500$, corresponde a uma distância de $7,8 \times 10^6$ parsecs. Visto que a magnitude aparente vale 11,8, a magnitude absoluta a tal distância vale $-17,65$, que é da ordem correta para as nebulosas mais brilhantes em um aglomerado. Uma distância preliminar, derivada independentemente do aglomerado do qual esta nebulosa parece ser membro, é da ordem de 7×10^6 parsecs.

Novos dados esperados no futuro próximo podem modificar a relevância da presente investigação ou, se confirmatórios, conduzirão a uma solução com muitas vezes mais peso.²⁸ Por essa razão, considera-se prematuro discutir em detalhes as consequências óbvias dos presentes resultados. Por exemplo, se o movimento solar em relação aos aglomerados representa a rotação do sistema galáctico, este movimento poderia ser subtraído dos resultados para as nebulosas e o resto representaria o movimento do sistema

²⁶[N.T.]: Na Figura 1, reproduzida do artigo original de Hubble, embora a unidade exibida no eixo das velocidades radiais seja km, os valores utilizados de fato estão em km/s.

²⁷[N.T.]: As retas correspondentes a cada solução foram plotadas a partir da função $v_r = Kr$ na qual v_r é a velocidade radial calculada no sistema de referência das galáxias e r a distância, utilizando-se os valores de K encontrados ao se resolver as equações de condição.

²⁸[N.T.]: Em julho de 1931, Hubble publicou, em conjunto com Milton Humason (1891-1972), o artigo *The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae* no volume 74 do *Astrophysical Journal*, no qual a relação velocidade-distância foi reexaminada, com o acréscimo de 40 velocidades radiais e envolvendo galáxias situadas a uma distância de até 32 milhões de parsecs. Neste trabalho, a relação linear foi verificada com maior robustez e o termo K foi determinado com o valor de 558 km/s por megaparsec.

galáctico em relação às nebulosas extragalácticas.

A característica notável, no entanto, é a possibilidade de que a relação velocidade-distância possa representar o efeito de Sitter e, portanto, que dados numéricos possam ser introduzidos em discussões sobre a curvatura geral do espaço. Na cosmologia de de Sitter, deslocamentos dos espectros surgem de duas fontes, um retardamento aparente das vibrações atômicas e uma tendência geral das partículas materiais se espalharem. Esta última envolve uma aceleração e, portanto, introduz o elemento do tempo.²⁹ A importância relativa desses dois efeitos deve determinar a forma da relação entre distâncias e velocidades observadas; e, neste contexto, pode-se enfatizar que a relação linear encontrada na presente discussão é uma primeira aproximação representando uma faixa restrita de distâncias.

Referências

- [1] E. P. Hubble, *Extra-galactic nebulae*, The Astrophysical Journal **64**, 321 (1926), reimpresso em Contributions from the Mount Wilson Observatory, **324**, 1 (1926).
- [2] H. Shapley e A. Ames, *A Study of a Cluster of Bright Spiral Nebulae*, Harvard College Observatory Circular **294**, 1 (1926). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1926HarCi.294.1S>, acesso em fev. 2024.
- [3] K. Lundmark, *The Motions and the Distances of Spiral Nebulae*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **85**, 865 (1925).
- [4] M. L. Humason, *The Large Radial Velocity of N. G. C. 7619*, Proceedings of the National Academy of Science **15**(3), 167 (1929).

²⁹[N.T.]: Conforme esclarece Helge S. Kragh no livro *Conceptions of the Cosmos*, o cosmólogo holandês Willem de Sitter (1872-1934) obteve, em 1917, uma solução para as equações de campo cosmológicas da Relatividade Geral correspondente a um Universo sem matéria e espacialmente fechado. Este modelo previa desvios sistemáticos para o vermelho das linhas espectrais das galáxias, que tendiam a crescer com a distância ao observador (o chamado “efeito de Sitter”). No entanto, as velocidades radiais positivas associadas não eram consideradas como resultantes da expansão do espaço, pois se assumia que o modelo proposto era estático. Para de Sitter, havia a possibilidade de a densidade do Universo ser tão baixa que o seu modelo, embora desprovido de matéria, pudesse ser aplicado ao mundo real como uma aproximação de densidade nula.

Alexei Alexandrovich Starobinsky (1948 – 2023)



No dia 21 de dezembro a ciência sofreu uma grande perda com falecimento do Prof. Alexei A. Starobinsky. Anexo a esta carta, está uma cópia do obituário emitido pelo Presidente do Conselho do BRICS *Association on Gravity, Astrophysics and Cosmology* (BRICS-AGAC) com informações básicas sobre a carreira do Prof. A. Starobinsky. O que escrevi abaixo, não é uma exposição completa e nem oficial sobre o Prof. Starobinsky, é mais baseado nos meus pensamentos e opiniões pessoais.

Sem dúvida, Prof. Starobinsky foi um dos mais respeitados cosmólogos de mundo e, de modo mais geral, uma das mais importantes figuras de física gravitacional. É difícil encontrar um livro de cosmologia ou de física de buracos negros onde trabalhos dele não sejam citados, sempre com muito respeito e como uma das principais contribuições das áreas de pesquisa correspondentes. Durante mais de uma década de nossos contatos e colaborações eu sempre tinha impressão que estou lidando com pessoa incomum, muito “fora de curva”. Starobinsky teve opiniões independentes não somente em física, mas sobre vários aspectos de vida, política e arte. Não sempre concordamos, mas sempre foi possível discutir as nossas diferenças e as discussões sempre foram muito esclarecedoras. E, claro, há uma segurança maior quando é possível fazer pergunta e receber resposta de uma pessoa super-qualificada.

A trajetória acadêmica do Starobinsky começou sob orientação do membro de Academia de Ciências de União Soviética, e um dos mais importantes físicos do século XX, Yakov B. Zeldovich. Zeldovich foi famoso pelas contribuições importantes em diferentes partes de física, de fundamentos teóricos de bombas atômicas e teoria de explosões até química, cosmologia e astrofísica. No último caso, a grande parte de cosmólogos importantes de hoje são “descendentes

científicos” do Zeldovich, incluindo Starobinsky. Em 1971, o primeiro artigo do Starobinsky foi publicado em coautoria com Zeldovich. Este trabalho foi a base do diploma de graduação de Starobinsky, tem hoje mais de 500 citações e é considerado muito importante na área de teoria de campos em espaço-tempo curvo. De fato, este foi um dos primeiros trabalhos (historicamente, depois dos artigos de L. Parker nos anos 60) com cálculos consistentes da taxa de criação de partículas em cosmologia primordial. Neste primeiro trabalho de Starobinsky e Zeldovich, foi criada uma nova técnica de regularização de divergências ultravioletas, apropriada para uso prático em espaço-tempo curvo, especialmente em cosmologia. Vale apenas mencionar que esta técnica deu início de métodos de regularização importantes e especificamente aplicadas (e.g., chamada regularização adiabática) em espaço-tempo cosmológico.

Depois destes trabalhos iniciais, Starobinsky deu contribuições em várias partes de física gravitacional, especialmente em cosmologia primordial, onde ele sugeriu o primeiro modelo prático de inflação. Em 1980 Starobinsky usou as equações obtidas antes pelos M. V. Fischetti, J. B. Hartle e B. L. Hu (antes deles, houve resultados muito próximos obtidos por P. C. W. Davies) para descrever a fase inicial do Universo. O modelo inclui a parte complicada que venha de anomalia conforme (ou seja, de efeitos quânticos de vácuo em espaço-tempo curvo), e o termo de quadrado de escalar de Ricci. Este termo também é gerado pela anomalia, mas é ambíguo e Starobinsky usou sua grande experiência e entendimento profundo de cosmologia para aumentar o coeficiente deste termo por muitas ordens de grandeza. Como resultado, o modelo simplificou, porque a parte considerada pelo Fischetti, Hartle e Hu ficou muito menos relevante. Na época, argumentos fenomenológicos foram usados para definir o mencionado coeficiente do termo com quadrado de curvatura escalar, mudando a expressão sugerida em trabalhos anteriores por outros autores.

Assim foi criado o primeiro modelo de inflação, um ano antes que a própria palavra fosse introduzida por A. Guth. Até hoje, este modelo, matematicamente simples, fornece o melhor ajuste aos dados observacionais e é considerado como modelo de referência para modelos mais sofisticados, que são muito numerosos. Entretanto, se um outro modelo mostrar uma discrepância significativa com o de Starobinsky, ele deve ser descartado!

A experiência adquirida nos anos anteriores em trabalhos com derivadas superiores (juntos com V. Ts. Gurovich) ajudou Starobinsky resolver a equação complicada de terceira ordem e construir diagramas de fase. Foi usada a versão instável do modelo de Fischetti, Hartle e Hu. Isso foi uma consequência direta da escolha de grande coeficiente e sinal do termo com quadrado de escalar de Ricci. Nos últimos anos colaboramos com Starobinsky em tentativas de explicar a transição de regime estável para o instável, o que é bom para cosmologia observational. Tal transição poderia explicar as condições iniciais para inflação. Acabamos com uma conclusão geral que tudo isso pode funcionar, mas precisa ter novos modelos de fenomenologia de partículas, com propriedades diferentes dos existentes atualmente.

Uma formulação do modelo inflacionário, mais detalhada e com uma avaliação precisa do coeficiente associado à potência quadrada do escalar de Ricci, foi elaborada pelo Prof. Starobinsky já em 1983. Na época, o modelo encontrou duras críticas no próprio Instituto Landau,

em Moscou, onde o autor trabalhou. A crença geral que teorias com derivadas superiores não podem produzir resultados confiáveis foi aplicada ao modelo de Starobinsky. Mas, tal crítica se revelou improcedente porque no modelo de Starobinsky não há instabilidades que são, no entanto, típicas para outras versões de teorias contendo derivadas superiores.

No mais de meio século que passou desde o primeiro artigo de 1971, Starobinsky deu contribuições importantes em muitas áreas da física gravitacional, especialmente cosmologia e física de buracos negros. A influência dos trabalhos de Starobinsky é grande também em assuntos ligados às correções quânticas aplicadas à cosmologia. Podemos dizer que em todas estas áreas o Prof. Alexei A. Starobinsky foi a maior autoridade mundial, na opinião de muitos pesquisadores.

As colaborações dele foram muito amplas, incluindo vários grupos de pesquisa na Rússia, mas também no Japão, Coreia, Europa (especialmente França e Itália), Índia e no Brasil. Ele participou de uma enorme quantidade de eventos importantes, e foi membro de comitês de organização dos principais eventos na área de física gravitacional. Entre seus alunos podemos indicar cosmólogos muito reconhecidos, com Lev Kofman e Varum Sahni. De modo geral, a influência de Starobinsky para a nossa área de pesquisa foi enorme. Eu lembro de muitos casos em que pessoas (inclusive eu) começaram discutir um assunto com ele, iniciando com uma opinião e saindo com outra, mais correta. E também alguns casos de pessoas que tentaram defender a sua posição dizendo que “Foi discutido com Starobinsky e ele aprovou isso.” Infelizmente, temos a triste situação de perder um grande cientista, colaborador e também a pessoa que poderia dar sua opinião de máxima autoridade e conhecimento.

No Brasil, ele teve várias colaborações frutíferas, inclusive com membros do PPGCosmo e com o nosso grupo na UFJF. Os interesses dele no Brasil foram muito além da cosmologia e gravitação quântica. Ele sempre queria conhecer cidades históricas de Minas Gerais, e foi muito feliz quando eu e a minha aluna, Ana Pelinson, o levamos para Tiradentes, quase vinte anos atrás. Durante as próximas décadas, em cada visita ele contratava um motorista particular (só uma vez eu levei ele de graça), para ver esculturas do Aleijadinho em Congonhas. Ele já sabia a história de cada uma destas maravilhosas obras de arte e poderia dar aulas sobre isso. Inclusive, acho que seria bom as autoridades tomarem conta melhor da preservação destas obras e da organização de ambiente mais adequados para suas exposições, como foi feito em Florença com os trabalhos de Michelangelo. Posso mencionar que esta comparação pertence ao Starobinsky, ele realmente admirava todos trabalhos de Aleijadinho. Finalmente, quanto visitamos Ouro Preto (a foto no início desse texto foi tirada lá), Starobinsky ficou muito feliz em conhecer aquela cidade. Ele chegou lá com o mapa inteiro “na cabeça”, e quando nós nos perdemos na saída da cidade, conseguiu indicar caminho como um “GPS vivo”.

Ilya L. Shapiro
Universidade Federal de Juiz de Fora

Caros colegas,

Nunca pensei que escreveria um obituário para Prof. A. Starobinsky, nosso querido amigo, mentor e Presidente do Conselho Geral da AGAC-BRIC. Por favor, divulguem a seguinte mensagem.

*Rong-gen Cai
Presidente do Conselho
AGAC-BRICS*

OBITUÁRIO

Com profunda tristeza e pesar, informamos sobre o triste e inoportuno falecimento do nosso querido colega e amigo, Alexei Starobinsky. Prof. Starobinsky foi um importante cosmólogo conhecido por seu trabalho seminal e contribuições para a inflação cosmológica, criação de partículas no início universo, teorias modificadas da gravidade e energia escura. A inflação proposta por Starobinsky é atualmente o melhor modelo, tanto do ponto de vista teórico quanto do ponto de vista observacional.

Por suas notáveis contribuições à cosmologia, Starobinsky ganhou o Prêmio Tomalla em 2009, a Medalha Oskar Klein em 2010, Prêmio Amaldi Medalha em 2012 e, em 2013, o Prêmio Gruber de Cosmologia. Starobinsky recebeu o Prêmio Kavli da Academia Norueguesa de Ciências em 2014. Em 2019, recebeu a Medalha Dirac (ICTP).

O Prof. Starobinsky acreditava firmemente no potencial científico dos colegas nos países do BRICS. Ele foi uma fonte de inspiração para colegas dos países do BRICS. Com o seu gentil apoio, o BRICS associação para gravidade, astrofísica e cosmologia, chamada BRICS-AGAC, surgiu em 2016. Desde a sua criação, a associação desempenhou um papel importante ao reunir especialistas em uma plataforma destas nações, o que deu origem a uma colaboração ativa entre os especialistas em cosmologia, gravitação e astrofísica.

A morte prematura do Prof. Starobinky deixou um vácuo que será difícil preencher. Ele sempre viverá em nossas memórias e corações, e seus pensamentos e carinho por todos nós continuarão nos inspirando para sempre. Possa sua alma descansar em paz e que seus familiares tenham coragem de reconciliar-se com a perda inimaginável que lhes ocorreu.

Ennio Candotti (1942 – 2023)



Faleceu dia 6 de dezembro de 2023 o professor Ennio Candotti. Foi uma grande perda para o mundo científico e cultural brasileiro. O Brasil perde de um dos mais ativos e instigantes nomes acadêmicos que atuou em nosso país.

Ennio Candotti nasceu em Roma, Itália, em 12 de fevereiro de 1942. Emigrou para o Brasil em 1952 junto com a sua família, se instalando em São Paulo, onde completou sua formação básica, ingressando posteriormente no curso de Física da Universidade de São Paulo (USP). Ele prosseguiu com sua formação acadêmica com pós-graduação e pós-doutorado em Nápoles e Pisa, Itália, e posteriormente em Munique, Alemanha. Seus estudos versaram sobre relatividade geral e física-matemática. De volta ao Brasil, se tornou professor na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e, posteriormente, a partir de 1996, na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), instituição pela qual viria a se aposentar.

Sua atuação em gestão, política científica e popularização da ciência foi intensa e fez dele um nome de destaque no mundo acadêmico brasileiro. Foi várias presidente da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), uma das principais sociedades científicas nacionais. Neste período à frente da SBPC, participou da fundação da revista *Ciência hoje* dedicada a levar ao grande público o que se fazia em ciência no Brasil, em uma linguagem acessível, mas rigorosa, com textos sempre escritos por especialistas nas diversas temáticas de atualidade científica. É uma publicação que marcou época no cenário cultural e científico brasileiro e se tornou rapidamente uma referência sobre as atividades acadêmicas no país e da ciência em geral. *Ciência hoje* continua sendo, 40 anos depois de sua fundação, uma publicação de destaque no Brasil, marcada pela suas diversidade temática, cobrindo todos os domínios acadêmicos e científicos, e com textos de excelente nível.

Na esteira da *Ciência hoje*, Candotti incentivou a criação da versão infantil, *Ciência hoje das*

crianças, e da sua congênere argentina, *Ciencia hoy*.

Suas múltiplas iniciativas e atividades em Divulgação Científica lhe valeram o prestigioso prêmio Kalinga da Unesco em 1998, prêmio que ele recebeu em evento da Unesco na Índia em 1999. Ennio também atuou intensamente em política científica. Foi membro do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia em duas ocasiões, de 2003 a 2007, e de 2011 a 2015. Também foi membro do Conselho de Desenvolvimento Econômico e Social (CDES), em 2023, atividade que a morte interromperia.

Ennio se aposentou da Ufes em 2008. Mas, ele era um espírito muito inquieto para “levar a sério” a aposentadoria. Continuou a desenvolver novos projetos. Ele se instalou em Manaus, Amazônia, tornou-se professor da Universidade Federal da Amazônia, e iniciou o que seria o seu último grande “empreendimento acadêmico”: a criação do Musa, Museu da Amazônia. Trata-se de um museu que reúne concepções inovadoras procurando refletir a riqueza do mundo amazônico, da floresta e dos povos que nela vivem. Sobre o Musa, Ennio escreveu um cativante texto nos *Cadernos de Astronomia*.¹ Vale a pena relembrar a descrição que ele faz do museu neste texto:

O Museu da Amazônia, o Musa, é um museu vivo, a céu aberto na Reserva Ducke, uma floresta primária na cidade de Manaus. O Musa está empenhado em divulgar para o grande público os segredos desta floresta. Mostrar ao vivo, em seu habitat natural, as plantas, os pássaros, insetos, flores e polinizadores. É propósito do Musa em suas exposições valorizar os saberes das culturas indígenas que habitaram e ainda habitam as florestas amazônicas.

Já conhecia as intensas atividades acadêmicas de Ennio Candotti quando ele ingressou no Departamento de Física da Ufes em 1996. A partir deste momento, pude apreciar de perto todo dinamismo e ampla visão acadêmica de Ennio. Logo depois de sua vinda para a Ufes, ele ministrou o curso de extensão *Arte e ciência no renascimento italiano*. A vasta cultura e grande sensibilidade científica e artística de Ennio maravilharam os participantes do curso.

Posteriormente, atuei em um curso de atualização para professores do ensino médio por ele coordenado. Pouco a pouco, Ennio montou um *kit* de experimentos simples, mas altamente ilustrativos, da física que se aborda no ensino médio. Se adotado pelos gestores públicos de educação, este kit contornaria muitas das dificuldades encontradas para montar um bom laboratório de física nas escolas do ensino médio. Durante este mesmo curso, pude assistir várias palestras de Ennio para professores e público em geral onde ele discorria de forma envolvente, por exemplo, sobre o significado das contribuições de Galileu para a ciência.

Ennio se foi, mas seu legado é imenso. Esperamos que esta sua última iniciativa, o Musa, persevere no caminho que ele idealizou: um museu vivo e que expresse toda a grandeza da floresta amazônica.

Júlio Fabris
Universidade Federal do Espírito Santo

¹E. Candotti, Viver Juntos no Musa, *Cad. Astro.* 2(1), 115 (2021).