

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências  
Atmosféricas  
Departamento de Astronomia

O Grande Debate e a Descoberta da Expansão do  
Universo

Julio Lamon

São Paulo  
2017

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências  
Atmosféricas  
Departamento de Astronomia

O Grande Debate e a Descoberta da Expansão do  
Universo

Julio Lamon

Dissertação apresentada no Departamento de Astronomia (IAG) da  
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do  
título de Mestre em Ensino de Astronomia

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. José Ademir de Sales Lima

**Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.**

São Paulo  
2017

Aos meus pais

À minha esposa Solange Aparecida da Silva Lamon, pelo seu amor, estímulo e apoio.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Ademir Sales de Lima, pela orientação e pelo tema sugerido, pelos debates nas aulas de cosmologia, os quais contribuíram muito para minha formação e por dividir sua grande experiência.

À minha esposa Solange, pelo seu estímulo, amor, apoio, conselhos e paciência.

Aos professores do Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, em especial o corpo docente do Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia: Amâncio Cesar Santos Friaça, Augusto Damini Neto, Claudemir Roque Tossato, Elysandra Figueredo Cypriano, Enos Picazzio, Jane Gregório-Hetem, Jorge Ernesto Horvath, José Ademir Sales de Lima, Martha Marandino, Nelson Vani Leister, Ramachrisna Teixeira, Roberto Boczeko e Roberto D. Dias Costa.

Aos alunos do Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia, em especial aos colegas da primeira turma.

Aos funcionários do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, por toda a assistência prestada.

A todos os professores da minha vida acadêmica.

“Assim, creio que não é mau resultado ter posto fim às disputas referentes à Galáxia, ou antes, Via Láctea, descobrindo aos sentidos e mais ainda ao intelecto a sua essência. Além disto, belíssimo e agradável será de mostrar claramente que a natureza daquelas estrelas que até o presente os astrônomos têm denominado nebulosas é bem diferente do que até agora se acreditou. Mas o que supera em muito toda admiração... é precisamente ter descoberto quatro estrelas errantes que ninguém antes de nós conheceu nem observou, as quais, à semelhança de Vênus e Mercúrio em torno do Sol, apresentam seus próprios períodos em torno de uma estrela ilustre... ”

Galileu Galilei - O Mensageiro das Estrelas

Os seres humanos podem ansiar pela certeza absoluta; podem aspirar a alcançá-la; ... Mas a história da ciência - de longe o mais bem-sucedido conhecimento acessível aos seres humanos - ensina que o máximo que podemos esperar é um aprendizado por meio de nossos erros, uma abordagem assintótica do Universo, mas com a condição de que a certeza absoluta sempre nos escapará.

Carl Sagan - O Mundo Assombrado por Demônios

## RESUMO

No século XVIII, alguns objetos celestes difusos que podiam ser observados a vista desarmada ficaram bastante conhecidos como nebulosas. Em 1755, o filósofo Immanuel Kant (1789 -1804) sugeriu que as nebulosas seriam sistemas estelares como a Via Láctea; introduzindo assim a noção de “Universos-Ilha”. Em 1789, o astrônomo William Herschel (1738-1822), o maior construtor de telescópios da época, publicou um catálogo com mais de mil nebulosas. Por mais de dois séculos permaneceu em aberto a questão da localidade das nebulosas. Em outras palavras, seria a Via Láctea todo o Universo incluindo as nebulosas, ou as nebulosas seriam os kantianos “Universos-Ilha”? Essa questão foi analisada no que ficaria conhecido como “O Grande Debate” entre os astrônomos Harlow Shapley e Heber Curtis, realizado em 1920 na sede da Academia de Ciências Americana (Washington). O debate terminou inconclusivo devido à dificuldade de se medir grandes distâncias em Astronomia. No final de 1923, o mistério foi resolvido por Edwin Hubble, ao estimar a distância até a nebulosa de Andrômeda (M31), demonstrando inequivocamente que estava fora da Via Láctea. Dessa forma, utilizando a calibração das estrelas variáveis Cefeídas - proposta por Henrietta Leavitt e sugerida para medir distâncias até as nebulosas por Harlow Shapley - Hubble fundou uma nova área do conhecimento, a chamada Astronomia Extragaláctica. A verdadeira cosmologia observacional dava seus primeiros passos. Em 1929, utilizando medidas de velocidade e distância para uma amostra de vinte e duas nebulosas (galáxias), Hubble descobriu a expansão do Universo.

Nesse contexto, discutiremos na presente dissertação as principais contribuições observacionais responsáveis pelo notável progresso da astronomia ocorrido entre o Grande Debate e a descoberta da expansão Universal.

## ABSTRACT

In the eighteenth century, some diffuse celestial objects that could be seen in the unaided view became well known as nebulae. In 1755, the philosopher Immanuel Kant (1724-1804) suggested that the nebulae would be stellar systems like the Milky Way, thereby introducing the notion of "Island Universes". In 1789, astronomer William Herschel (1738-1822), the greatest telescope builder of the time, published a catalog of more than one thousand nebulae. For more than two centuries the question of the location of the nebulae remained open. In other words, would the Milky Way be the whole Universe including the nebulae, or would the nebulae be the Kantian "Island Universes"? This issue was analyzed in what would become known as "The Great Debate" between Harlow Shapley and Heber Curtis astronomers, held in 1920 at the American Academy of Sciences (Washington). The debate ended inconclusively due to the difficulty of measuring great distances in Astronomy. In late 1923, the mystery was solved by Edwin Hubble, estimating the distance to the Andromeda nebula (M31) and demonstrating unequivocally that it was outside the Milky Way. Thus, by using the calibration of the variable stars Cepheids - proposed by Henrietta Leavitt and suggested to measure distances up to the nebulae by Harlow Shapley - Hubble founded a new area of knowledge, called Extragalactic Astronomy. True observational cosmology took its first steps. In 1929, using measures of velocity and distance for a sample of 22 nebulae (galaxies), Hubble discovered the expansion of the Universe.

In this context, we will discuss in this dissertation the details of the contributions responsible for the remarkable observational progress of astronomy between the Great Debate and the discovery of the Universal expansion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Espectro solar determinado por Fraunhofer.....	11
Figura 2	Amostra de espectros de estrelas.....	12
Figura 3	Desenho de Herschel representando a Via Láctea.....	13
Figura 4	Órbita da Terra e o ângulo de paralaxe.....	20
Figura 5	Movimento próprio: velocidade tangencial ( $V_t$ ) Adaptado <a href="http://astro.if.ufrgs.br/vialac/node4.htm">http://astro.if.ufrgs.br/vialac/node4.htm</a> .....	21
Figura 6	Distâncias angulares Adaptado <a href="http://www.apolo11.com/distancias_no_ceu.php">http://www.apolo11.com/distancias_no_ceu.php</a> .....	23
Figura 7	Diagrama Hertzsprung-Russell Diagrama HR.....	28
Figura 8	Gráfico original de Henrietta Leavitt; Relação entre o período (P) Da Cefeidas e a sua magnitude absoluta (M) .....	29
Figura 9	Gráfico de calibração da relação período, magnitude absoluta elaborado por Hertzsprung.....	30
Figura 10	O Universo no início do século XX .....	32
Figura 11	The Scale of the Universe, Capa do Boletim contendo as apresentações de Shapley e Curtis.....	37
Figura 12	Harlow Shapley.....	38
Figura 13	Distâncias de aglomerados globulares obtidas por Shapley.....	39
Figura 14	Universo de Harlow Shapley.....	40
Figura 15	Heber D. Curtis.....	41

Figura 16	Universo de Heber D. Curtis.....	47
Figura 17	Escala de distância - Métodos para determinar distâncias e seus respectivos limites.....	49
Figura 18	Edwin Powell Hubble.....	51
Figura 19	Amostra de Nebulosas – 15.000 nebulosas foram catalogadas até 1908.....	51
Figura 20	Classificação de nebulosas efetuada por Hubble.....	52
Figura 21	Classificação de nebulosas atualizada.....	52
Figura 22	Imagem da Cefeídas em Andrômeda (M31) observada por Hubble.....	54
Figura 23	Gráfico mostrando a variação da luminosidade da Cefeídas em M31 Elaborado por Hubble.....	55
Figura 24	Universo de Hubble.....	56
Figura 25	22 Cefeídas na galáxia do triângulo M33.....	57
Figura 26	12 Cefeídas em Andrômeda M31.....	57
Figura 27	Distâncias estimadas a partir da Velocidades Radiais.....	63
Figura 28	Diagrama de Hubble, Velocidades Radiais em função das Distâncias.....	64
Figura 29	Relação Velocidade – Distância para Nebulosas Extra Galáctica.....	66
Figura 30	Variação da constante de Hubble ( $H_0$ ) entre 1920 e 1980.....	68
Figura 31	Diagrama de Hubble, com eventos de Supernovas tipo Ia.....	71

Figura 32	Fator de escala - Expansão do espaço.....	72
Figura 33	Fundadores da Cosmologia Moderna .....	75
Figura 34	Principais contributos para a descoberta da expansão universal.....	79
Figura A.1	Deslocamento aparente da estrela, Paralaxe.....	80
Figura A.2	Órbita da Terra e o ângulo de paralaxe.....	81
Figura B.1	Diagrama HR original de Russell.....	84
Figura C.1	Distância dos aglomerados globulares até o plano galáctico.....	86
Figura C.2	Distância do plano galáctico em função da distância projetada no plano galáctico.....	87
Figura C.3	Aglomerados globulares projetados no plano da galáxia.....	88
Figura D.1	Movimentos internos Messier 101.....	89
Figura D.2	Movimento de rotação de Messier 101.....	90
Figura D.3	Movimento próprio das estrelas.....	91
Figura E.1	Efeito Doppler para uma fonte sonora.....	92
Figura E.2	Efeito Doppler para uma fonte luminosa.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Linhas absorção. Espectro solar determinado por Fraunhofer.....	11
Tabela 2	Magnitudes Aparentes; classificação de Hiparco.....	25
Tabela 3	Magnitudes aparentes para estrelas da Via Láctea segundo Curtis.....	43
Tabela 4	Métodos para determinar distâncias e seus respectivos limites.....	47
Tabela 5	Distâncias de aglomerados globulares de acordo com Shapley.....	48

## SUMÁRIO

		<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
Capítulo	1	<b>COSMOLOGIA: DOS GREGOS AO SÉCULO XX; UMA CRONOLOGIA.....</b>	<b>5</b>
	1.1	Introdução .....	5
	1.2	Antiguidade – Grécia antiga .....	5
	1.3	Do renascimento ao início do século XIX .....	8
	1.4	Astronomia e as origens da Cosmologia moderna .....	14
Capítulo	2	<b>DISTÂNCIAS EM COSMOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
	2.1	Introdução.....	19
	2.2	Distância 1: Paralaxe Trigonométrica.....	19
	2.3	Distância 2: Movimento Próprio.....	21
	2.4	Conceito de Vela Padrão: Luminosidade, Fluxo e Magnitudes....	23
	2.5	Distância 3: Paralaxe espectroscópica.....	27
	2.6	Distância 4: Método da Cefeidas.....	29
Capítulo	3	<b>O GRANDE DEBATE.....</b>	<b>32</b>
	3.1	Introdução.....	32
	3.2	A proposta do debate.....	33
	3.3	Harlow Shapley - O primeiro tópico, o tamanho da Via Láctea..	38
	3.4	Heber D. Curtis - O segundo tópico, existência dos Universos ilha.....	41
	3.5	Analisando o grande debate.....	47
	3.6	Encerrando a ambiguidade do grande debate.....	50
Capítulo	4	<b>A DESCOBERTA DA EXPANSÃO DO UNIVERSO.....</b>	<b>59</b>
	4.1	Introdução.....	59
	4.2	A caminho do Universo em expansão.....	60
	4.3	O Trabalho de Hubble e Humason.....	61
	4.4	Sobre a Relevância do Trabalho de Hubble.....	69
		<b>COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
Apêndice	<b>A</b>	Distância: Paralaxe Trigonométrica.....	80
Apêndice	<b>B</b>	Diagrama de espectro-luminosidade - Diagrama HR.....	83
Apêndice	<b>C</b>	Resumo do artigo Globular Clusters and the Structure of the Galactic System de Harlow Shapley.....	86
Apêndice	<b>D</b>	Velocidade tangencial de M101(Galáxia do Cata-Vento) .....	89
Apêndice	<b>E</b>	Efeito Doppler.....	92
Apêndice	<b>F</b>	Demonstração da Equação de Friedmann.....	95

# INTRODUÇÃO GERAL

É bem conhecido que os primeiros cenários cósmicos nasceram de visões mitológicas antigas. Os mitos da criação eram baseados na ideia de que os deuses pertenciam a um plano superior e possuíam a capacidade de interferir na realidade observada. Essa ação dos deuses envolveria todos as manifestações da realidade, desde os fenômenos psicológicos até os naturais. Deste modo, as explicações para o mundo observado estavam associadas com as divindades, uma herança propagada pelos povos mais antigos. Até mesmo entre os babilônios, os primeiros povos a observar o céu com regularidade e fazer anotações dos movimentos de corpos celestes vistos a olho nu, as explicações mitológicas eram preponderantes [1-2].

No início, os gregos também foram influenciados pela mitologia, sem um claro distanciamento entre as ideias que hoje chamamos de cosmogônicas e uma explicação mais racional dos fenômenos astronômicos [2-3]. Posteriormente, Tales de Mileto (século VI a. C.), fundador da escola jônica e considerado o primeiro filósofo ocidental conhecido, propôs que embora tudo estivesse repleto de deuses, as explicações do mundo observado deveriam ser encontradas na própria realidade dos fenômenos, ou seja, baseados na razão [4-5]. Esta nova maneira de pensar se tornará um dos alicerces da ciência desenvolvida no mundo ocidental. Tales havia iniciado uma tradição de pensamento racional cujos defensores na Grécia antiga seriam - séculos depois - denominados por Aristóteles de filósofos Pré-Socráticos. Aristóteles dividiu os filósofos gregos em pré-socráticos e pós-socráticos, sendo ele mesmo um pós-socrático. Denominou de Pré-Socráticos todos os filósofos anteriores a Sócrates (469 - 399 a.C.)

Astrônomos, filósofos e geômetras gregos, dentre eles: Eudóxio, Aristóteles e Ptolomeu, elaboraram um modelo de Universo que sobreviveu por mais de 1500 anos. Na tradição grega, o Universo observado seria geocêntrico, finito, estático e composto além das estrelas distantes, pelo “sistema terrestre”: Terra, Lua, Sol e os cinco planetas observados a olho nu (os chamados errantes).

O geocentrismo foi seriamente desafiado apenas em 1543, com a proposta do modelo heliocêntrico por Nicolau Copérnico [6]. No entanto, o abandono do modelo

geocêntrico (terra no centro) em favor do heliocêntrico (sol no centro), bem mais simples do que geocêntrico, não foi imediato.

A queda do velho sistema geocêntrico exigiria ainda mais de um século e um esforço considerável de vários investigadores. Inicialmente a nova proposta foi minimamente e cuidadosamente justificada com base na elaboração de tabelas mais precisas para o mapeamento dos movimentos dos planetas. Depois vieram as contribuições de Tycho Brahe, Kepler e Galileu, demonstrando que uma lista de pressupostos do modelo Ptolomaico era inadequada ou não contemplada pelas observações [7]. Nesse sentido, apesar da resistência dos religiosos, as observações dos satélites de Júpiter realizadas por Galileu revelaram-se definitivas para provar que a Terra não era o centro do Universo.

Finalmente, Newton formulou as leis da mecânica e, com a sua gravitação universal, unificou teoricamente os trabalhos dos renascentistas, proporcionando a base matemática que faltava para os contributos de Copérnico, Kepler e Galileu [8-9]. Em particular, ele demonstrou como calcular as órbitas dos diferentes corpos celestes (planetas, cometas e asteroides). Posteriormente, Newton propôs também um modelo de Universo infinito, homogêneo e estático, com a matéria agregada pela atração gravitacional entre os corpos gravitantes [10]. Na época, o Universo observado era imaginado como totalmente formado pela Via Láctea.

Por outro lado, em meados do século XVIII, alguns objetos celestes difusos observados a vista desarmada já eram bastante referidos como nebulosas, embora sua estrutura e distância fossem completamente desconhecidos. O filósofo Immanuel Kant (1724-1804) sugeriu em 1755 que as nebulosas seriam sistemas estelares tal como a Via Láctea; introduzindo assim a noção de “Universos-Ilha”. Posteriormente, o astrônomo William Herschel (1738-1822), o maior construtor de telescópios da época, considerado o mais importante astrônomo entre Newton e o século XX, publicou em 1789 um catálogo com mais de 1000 nebulosas [11]. Não se sabia ainda se a Via Láctea era todo o Universo (incluindo as nebulosas), ou as nebulosas seriam os “Universos-Ilha” (fora da Via Láctea) propostos por Kant; uma dúvida que chegaria ao final da segunda década do século XX sem uma resposta definitiva.

Tal questão foi discutida no que ficaria conhecido como “O Grande Debate” entre os astrônomos Harlow Shapley e Heber Curtis, realizado em 1920 na sede da Academia de Ciências Americana (Washington). O debate terminou inconclusivo devido à

dificuldade prática e teórica (até aquela época) de se medir grandes distâncias em Astronomia.

Neste período, uma série de telescópios com maior poder de observação foram sendo inaugurados, dentre eles o telescópio Hooker de 2,5 metros, localizado no Monte Wilson (Califórnia), o maior deles. Com o desenvolvimento da fotografia e de outros instrumentos de observação (espectrógrafos) foi possível definir um novo método para medir grandes distâncias baseadas nas estrelas variáveis Cefeídas. Tornou-se então possível, pelo menos em princípio, determinar distâncias de estrelas mais afastadas, aglomerados de estrelas e nebulosas próximas. Deste modo, o tamanho e os limites da Via Láctea, bem como sua estrutura foi sendo aos poucos revelada.

No final de 1923, a ideia de “Universos-ilha” foi finalmente confirmada por Edwin Hubble, ao estimar a distância até a nebulosa de Andrômeda (M31). Hubble demonstrou inequivocamente que M31 estava fora da Via Láctea. Dessa forma, Hubble fundou uma nova área do conhecimento, a chamada Astronomia Extragaláctica. A verdadeira cosmologia observacional dava seus primeiros passos.

Paralelamente, a cosmologia teórica também avançava. Em 1915, Einstein havia proposto sua teoria de gravidade relativística, uma generalização da teoria gravitacional newtoniana que ficaria conhecida como Relatividade Geral [12]. Com base em sua teoria, Einstein construiu um modelo de Universo, homogêneo e isotrópico, estático e finito [13]. Posteriormente, em dois trabalhos consecutivos Friedmann (1922, 1924), abandonou a hipótese de Universo estático, obtendo soluções expansionistas [14]. Em 1927, Georges Lemaître [15], também publicou um artigo obtendo novas soluções expansionistas e demonstrando que a expansão estava diretamente correlacionada com o desvio para o vermelho das linhas espectrais (*redshift*) das nebulosas. Medidas de *redshift* vinham sendo determinadas por Vesto Slipher desde 1914 e uma extensa tabela resumindo os resultados até 1922 foi publicada por Arthur Eddington [16].

Finalmente, em 1929, o mesmo Hubble da galáxia M31, utilizando medidas de velocidade e distância para uma amostra de 22 nebulosas (galáxias), descobriu a expansão do Universo [18].

Nesse contexto, discutiremos na presente dissertação as contribuições observacionais responsáveis pelo notável progresso da astronomia ocorrido entre o “Grande Debate” e a descoberta da expansão universal por Hubble.

A presente dissertação está organizada da seguinte maneira: No capítulo 1, apresentamos uma cronologia, ou seja, uma linha do tempo descrevendo os fatos mais

relevantes que nos conduziram historicamente para o contexto investigado nesta monografia. Os principais investigadores e suas contribuições mais relevantes serão descritos em linhas gerais desde a antiguidade grega até o século XX; quando se consolidou a cosmologia relativística ou moderna.

No capítulo 2 descreveremos os principais métodos para estimar distâncias no contexto astronômico. Como veremos, conceitos geométricos básicos combinados com medidas angulares permitem avaliar distâncias para objetos próximos: Sol, Lua e alguns planetas, mas para as estrelas é inadequada. Apresentaremos então vários métodos para cálculo de distâncias em astronomia, alguns desenvolvidos entre a última metade do século XIX e as primeiras décadas do século XX.

No capítulo 3, discutiremos o que ficou conhecido na literatura como o Grande Debate. Como veremos, o tópico discutido no encontro foi a chamada escala de distância ou, mais precisamente, o tamanho da Via Láctea e os Universos-Ilha. Primeiramente, o astrônomo Harlow Shapley apresentou suas estimativas para o tamanho da Via Láctea, concluindo que as nebulosas seriam parte de nossa galáxia. Seu oponente, o também astrônomo Heber Doust Curtis, baseado em diferentes estimativas para o tamanho da Via Láctea, defendeu a existência dos “Universos-ilha” no sentido de Kant, ou seja, que as nebulosas espirais estariam fora de nossa galáxia. O debate terminou inconclusivo, sendo o problema resolvido apenas alguns anos depois, quando Hubble obteve a distância da nebulosa de Andrômeda.

No capítulo 4, discutiremos os trabalhos de Vesto Slipher e outros indicando que as galáxias distantes possuíam velocidades de afastamento em relação à Terra. Combinadas com as medidas de distância das nebulosas efetuadas por Hubble, tais resultados levaram a descoberta da recessão cósmica universal.

Finalmente, apresentaremos os comentários finais e nossa conclusão geral. Em quatro apêndices discutiremos os métodos para cálculo de distâncias, alguns resumos de artigos utilizados no grande debate e o efeito Doppler. Tais ferramentas são necessárias para compreender o ambiente histórico e os detalhes do trabalho de Hubble.

# CAPÍTULO 1

## COSMOLOGIA: DOS GREGOS AO SÉCULO XX; UMA CRONOLOGIA

### 1.1 Introdução

É bem conhecido que o desenvolvimento da cosmologia teve três momentos importantes: (i) o grego, (ii) renascentista e (iii) moderno. Em cada um desses períodos houveram mudanças fundamentais na visão do cosmos observado, sendo que os dois últimos períodos foram também alavancados por importantes avanços tecnológicos. No Renascimento, ocorreu o uso da luneta telescópica por Galileu e no período moderno a entrada em operação dos grandes telescópios.

Neste capítulo, com o intuito de chegar mais rapidamente ao contexto que será discutido nesta dissertação - o período decorrido entre o grande debate e a descoberta da expansão universal - apresentaremos uma cronologia, ou seja, uma linha do tempo dos principais investigadores e suas contribuições astronômicas e cosmológicas durante os três períodos de mudanças de paradigma. Em outras palavras, cobriremos desde os gregos, iniciando por Tales de Mileto [5], até a descoberta da expansão universal por Edwin Hubble, no final da terceira década do século XX [17]. A cronologia a seguir foi parcialmente baseada nos livros mencionados nas referências [1], [11], [19] e [18], respectivamente.

### 1.2 Antiguidade - Grécia Antiga

Nos primeiros modelos de cenários para o Universo da mitologia os deuses interferiam no mundo para criá-lo, transformá-lo, destruí-lo, entre outras coisas. Os deuses se encontravam num plano fora do mundo da natureza e dos homens, No século VI antes de Cristo nas cidades da antiga civilização grega um grupo de filósofos que ficaram conhecidos como Pré-Socráticos<sup>1</sup> elaboram um novo modo de pensar que sugere que a explicação da origem do mundo deve ser encontrada dentro na natureza e não fora dela.

---

<sup>1</sup> Aristóteles dividiu os filósofos gregos em pré-socráticos e pós-socráticos, sendo ele mesmo um pós-socrático. Denominou de Pré-Socráticos todos os filósofos anteriores a Sócrates (469 - 399 a.C.)

Esta nova maneira de pensar será a alicerce para formar o que chamamos de ciência do mundo ocidental. Dos pré-socráticos temos poucas informações. Em geral tudo que é conhecido são relatos e comentários ou fragmentos de filósofos posteriores a eles. No mundo grego destacaram-se os seguintes pensadores:

- Tales de Mileto (623 - 546 a.C.) - Filósofo, matemático e astrônomo grego. Considerado o primeiro filósofo ocidental conhecido. Fundou a Escola Jônica e propôs que as explicações do mundo real deveriam ser encontradas na da natureza e não fora dela. Postulou a existência de um “princípio único” para na natureza. Para Tales a água era este elemento primordial. Esta nova maneira de pensar será o sustentáculo para o que chamamos de ciência do mundo ocidental. Os filósofos da Escola Jônica ficaram conhecidos como Pré-Socráticos.
- Anaximandro de Mileto (610 - 547 a.C.) - Filósofo e astrônomo grego. Foi discípulo de Tales. Considerava que o "princípio único" sem relação com as substâncias conhecidas, e a denominou de "ápeiron", etérea matéria infinita, indestrutível e eterna. É atribuído a Anaximandro a medição dos solstícios e dos equinócios.
- Anaxímenes de Mileto (588-524 a.C.) – Filósofo grego. discípulo de Anaximandro. Considerava que o ar deveria ser o “princípio único”, pois se condensa virando água e se tornaria “fogo” devido a evaporação.
- Heráclito de Éfeso (540 - 476 a.C.) - Filósofo grego. Considerado o pai da lógica dialética, pois considerou a questão das mutações. Defendia que tudo estava em movimento, que a transformação era a característica mais elementar da natureza. Para Heráclito o fogo era o “princípio único”, e agente de todas as transformações.
- Eudoxo de Cnido (408 - 355 a.C.) – Filósofo grego. Aluno de Platão (427 - 347 a.C) e talvez o primeiro cosmólogo grego. Propôs um modelo de Universo para

explicar os movimentos dos corpos celestes. O sistema de Eudoxo possuía um total de vinte e sete esferas transparentes e concêntricas. Cada corpo celeste tinha sua esfera iniciando com Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter, Saturno e estrelas fixas nesta ordem. Todas as esferas se moveriam de oeste para leste e a Terra estaria fixa no centro, assim o sistema era geocêntrico e finito. O modelo de Eudoxo, também conhecido como “esferas homocêntricas” era meramente ilustrativo não apresentava nenhuma explicação física para o Universo. O sistema de mundo terá vida longa. Foi posteriormente aperfeiçoando por Aristóteles e Ptolomeu.

- Aristóteles de Estagira (384 - 322 a.C.) – Filósofo grego. Discípulo de Platão que se tornaria o maior pensador grego. Sua influência se faz sentir até os dias de hoje. Aristóteles se torna um observador e investigador do mundo físico, ao contrário de Platão que não considera relevante o estudo do mesmo. Platão e Aristóteles serão de grande importância para o desenvolvimento do pensamento ocidental. Aristóteles elaborou estudos em várias áreas, na física ele propõe que o movimento sempre deve ter uma causa e o repouso é sempre o estado natural para os corpos. Na cosmologia aristotélica ele considerava que existem cinco elementos fundamentais: terra, água, ar, fogo e o éter cósmico. O elemento terra (o mais “pesado”<sup>2</sup>) deveria estar no centro, este é o motivo do sistema ser geocêntrico, a água acima da terra, o ar acima da água e o fogo o mais “leve” estaria acima de todos, cada corpo tem seu lugar natural se move para ele e lá permanece em repouso. O modelo de Universo aristotélico está apoiado no sistema de Eudoxo, dividindo este modelo em duas partes: a região da Terra até a Lua era chamada de sublunar onde tudo era mutável é formado pelos quatro elementos; a região chamada supralunar que incluía a Lua até estrelas fixas onde tudo era formado pelo quinto elemento (o éter) que era imutável onde o único movimento possível na região supralunar era circular e uniforme em torno da Terra. Para Aristóteles existe uma lei para explicar o mundo mutável e corrupto da Terra e uma outra lei para o céu , perfeito e eterno. Sua física e cosmologia dominou o pensamento ocidental até o renascimento, muito embora alguns ecos de sua filosofia surjam até depois do século XV.

---

<sup>2</sup> Corpos mais pesados serão designados “os graves “ durante a idade média e o renascimento. O movimento de queda livre era chamado de movimento dos “graves”.

Aristóteles negava a existência das partículas indivisíveis da hipótese atomística e do vácuo.

- Aristarco de Samos (310.- 230 a.C.) – Astrônomo e matemático grego. Propõe o sistema heliocêntrico e utilizando geometria básica avaliou que a distância da Terra à Lua era quarenta vezes o diâmetro da Terra. Estimou também que a distância da Terra ao Sol era dezenove vezes a distância da Terra à Lua.
- Erastóstenes (276 - 194 a.C.) – Astrônomo, matemático e geógrafo grego. Foi diretor da biblioteca de Alexandria determinou o perímetro da Terra cerca de 250.000 estádios, da ordem de 40.000 km. Combinando seu trabalho com os resultados de Aristarco se estimou a distância Terra – Lua e Terra – Sol.
- Claudio Ptolomeu (100 - 170 d.C.) – Astrônomo, matemático e geógrafo grego. Em latim Claudius Ptolemaeus. Aperfeiçoou o modelo de Aristóteles colocando os planetas orbitando epiciclos cujo centro girava em torno da Terra com velocidade constante. Introduzindo conceitos tais como, equantes deferentes e epiciclos. As inovações de Ptolomeu permitiram explicar o movimento retrógrado dos planetas além de melhorar a precisão dos calendários uma vez que as previsões de eclipses não estavam corretas. Elaborou também um tratado de astronomia que era uma sinopse dos trabalhos de Aristóteles, Hiparco, Posidônio e outros astrônomos, contendo tabelas de observações de estrelas e planetas. Após a destruição da Biblioteca de Alexandria o tratado foi preservado e traduzido para o árabe. O Almagesto, como era conhecido, tornou-se maior fonte de conhecimento de astronomia da época e se converteu em um manual que orientou os astrônomos árabes e europeus até o aparecimento da teoria heliocêntrica de Copérnico. O modelo sobreviveu por aproximadamente 1300 anos, quando, por volta de 1500 d.C., dados observacionais já mostravam que o sistema Aristóteles-Ptolomeu era impreciso para elaborar calendários e prever eclipses.

### 1.3. Do Renascimento ao Início do Século XIX

Entre os séculos XIV e XV na Europa ocorre um lento desaparecimento da sociedade medieval. O comércio com cidades fora do continente, o contato com universidades árabes espalhadas pela Europa e os escritos gregos clássicos esquecidos desde a idade média, gradativamente produzem mudanças socioculturais que substituí o modo de vida medieval por um novo mundo ficou conhecido com renascimento. Obviamente as ciências também se modificam no renascimento. O modelo de Universo da antiguidade foi abandonado devido aos trabalhos de Copérnico, Brahe, Kepler e Galileu, culminando com a síntese realizada por Newton. As ideias baseadas na gravitação newtoniana sobreviveram até as duas primeiras décadas do século XX. Dentre os principais astrônomos e filósofos desse período destacam-se:

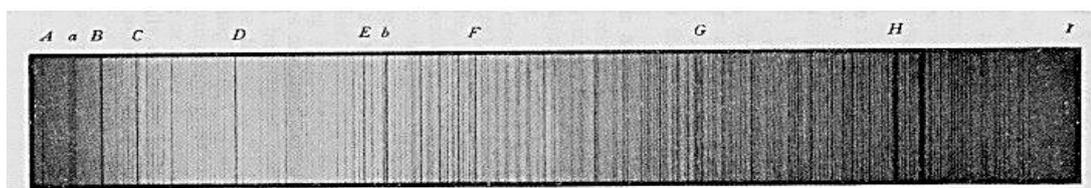
- Nicolau Copérnico (1473-1543) - Astrônomo e matemático polonês. Retoma o sistema heliocêntrico de Aristarco de Samos ordenando os planetas [20] em ordem crescente de distância até o Sol: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno, além de avaliar as distâncias dos planetas até o Sol utilizando a distância Terra-Sol como unidade.
- Tycho Brahe (1546 -1601) – Astrônomo dinamarquês. Sendo um aristocrata constrói o primeiro observatório moderno e com os melhores instrumentos astronômicos da época continua seu trabalho elaborando tabelas com as posições dos planetas, estuda e avalia as distâncias de um cometa e de uma estrela nova na constelação de Cassiopéia.
- Johannes Kepler (1571-1630) – Astrônomo e matemático alemão. Utilizando as tabelas das posições de Marte feitas por Tycho Brahe mostrou que as orbitas dos planetas não poderiam ser circulares, mas sim elípticas e que as velocidades das mesmas não eram constantes. Apresenta suas três leis: 1<sup>a</sup>) Cada planeta descreve uma orbita elíptica da qual o Sol ocupa um dos focos, 2<sup>a</sup>) O segmento de reta que une o Sol ao planeta “varre “ uma área proporcional ao intervalo de tempo gasto para percorre-la, 3<sup>a</sup>) O cubo da distância média  $r$  de um planeta ao Sol é proporcional ao quadrado do seu período  $T$  de revolução em torno do Sol,  $r^3 = k \cdot T^2$ . Deste modo abandona o sistema geocêntrico.

- Galileu Galilei (1564-1642) – Físico, matemático astrônomo italiano. Constrói o primeiro telescópio refrator para observar o céu. Em 1609 produziu uma série de descobertas: manchas no Sol, as fases do planeta Vênus, satélites no planeta Júpiter e sombras na Lua. Os trabalhos de Tycho, Kepler e Galileu revelaram que o modelo aristotélico-ptolomaico era inadequado.
- Isaac Newton (1642-1727) – Físico e matemático inglês. Em 5 de julho de 1687 Newton publicou sua monumental obra “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*”, onde propôs as leis da mecânica e a teoria da gravitação universal. Com a força da gravidade explicou os movimentos dos corpos celestes, explicando numa teoria única os trabalhos de Copérnico, Brahe, Kepler e Galileu. Nos *Principia*, Newton contestou Aristóteles considerando que é possível um movimento retilíneo e uniforme (MRU) sem a atuação de uma força. Newton construiu o primeiro telescópio refletor, posteriormente desenvolvido por astrônomos permitindo a descoberta de novos planetas, cometas, estrelas e nebulosas. Diferente de Aristóteles que considerava o Universo finito e geocêntrico, a teoria da gravitação universal lhe permitiu propor um novo modelo do Universo, infinito e heliocêntrico.
- Immanuel Kant (1724-1804) – Geógrafo, filósofo e físico alemão. Tendo como base um catálogo de todos os objetos nebulosos do céu elaborado por Charles Messier (1730-1817) propôs que estes objetos nebulosos seriam outros sistemas de estrelas semelhantes à nossa Via Láctea que Kant denominou de “Universos ilha”. Tais objetos tinham um aspecto difuso, por isto receberam o nome genérico de nebulosas. O termo nebulosa<sup>3</sup> se aplicava a qualquer objeto de aspecto difuso, uma vez que não se diferenciavam aglomerados globulares e nebulosas espirais (galáxia).

---

<sup>3</sup> Atualmente é costume definir nebulosa como sendo uma nuvem interestelar constituída por poeira, Hidrogênio, Hélio e outros gases. Conhecemos vários tipos de nebulosas; nebulosas de emissão, nebulosas de reflexão, nebulosas escuras, nebulosas planetárias e nebulosas remanescentes de supernovas.

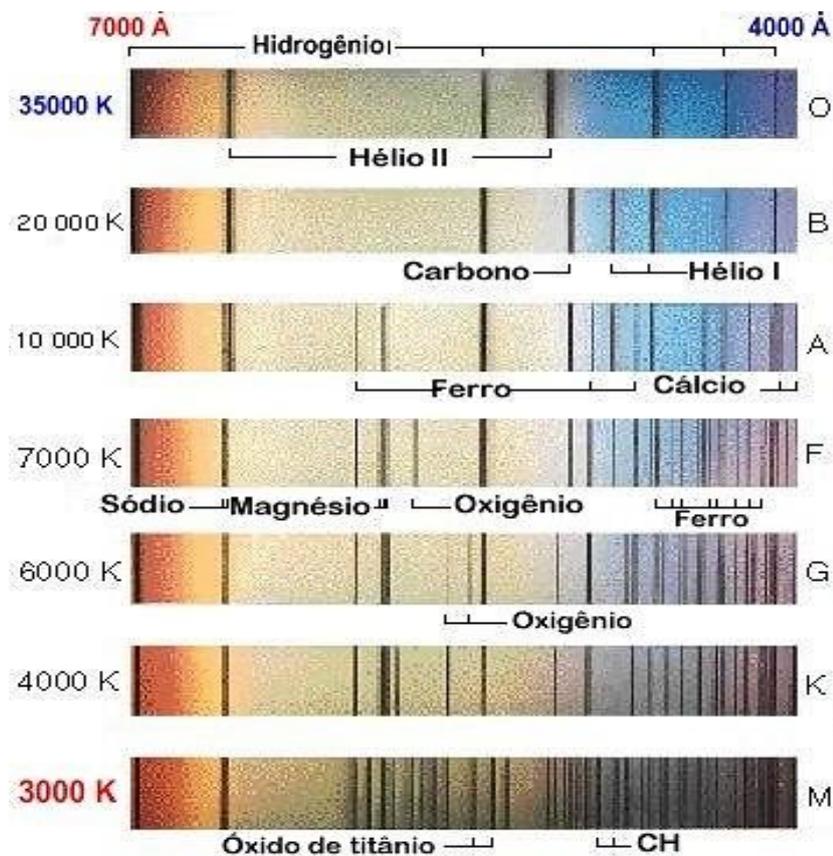
- Joseph von Fraunhofer (1787-1826) – Óptico, astrônomo, e físico alemão. Em 1814, analisando espectro solar [21], ele observou linhas escuras relacionadas com a absorção da radiação de comprimentos de ondas específicos (Figura 1). Tais linhas ficaram conhecidas com linhas de Fraunhofer. As letras maiúsculas A a I são utilizadas para classificar as linhas do espectro. Na **Tabela 1**, elaborada por Fraunhofer [21], estão os comprimentos de ondas que foram absorvidos pelo gás da estrela no caso o Sol. Fraunhofer determinou também o espectro das estrelas Sirius, Castor, Pollux, Capella, Betelgeuse e Procyon, e revelou que cada estrela tinha seu espectro específico. Com uma grande amostra de espectros é possível [22] (**Figura 2**) criar um padrão para identificar o espectro de uma nova estrela inclusive já sabendo qual sua temperatura. Esta descoberta será de grande importância na astronomia, para a elaboração do chamado diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) (ver **Figura. 7**).



**Figura 1 - Espectro solar determinado por Fraunhofer. As linhas escuras resultam da absorção da radiação com comprimentos de ondas específicos (Tabela 1). Foram denominadas linhas de Fraunhofer (A, B, C) (extraída de [21]).**

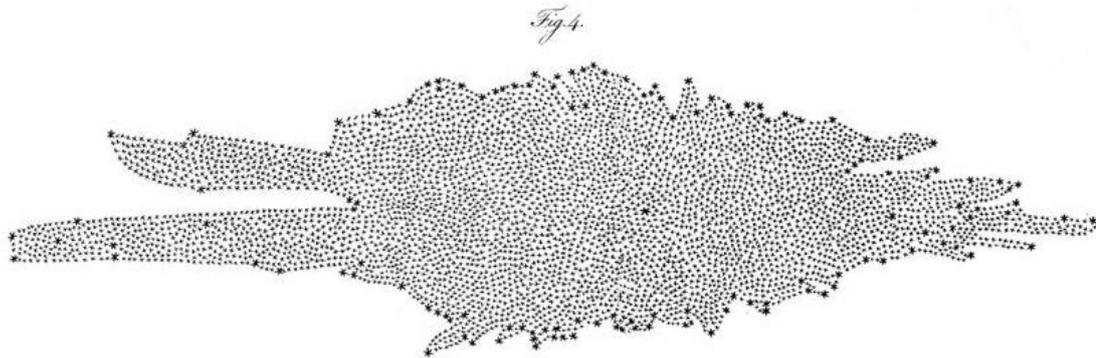
LETRA	Comp. de onda nm	Cor	Elemento
A	759,37	Vermelho escuro	O <sub>2</sub> atmosférico
B	686,72	Vermelho	O <sub>2</sub> atmosférico
C	656,28	Vermelho	Hidrogênio alfa
D <sub>1</sub>	589,59	Vermelho alaranjado	Sódio neutro
D <sub>2</sub>	589,00	Amarelo	Sódio neutro
E	526,96	Verde	Ferro neutro
F	486,1	Ciano	Hidrogênio beta
G	431,42	Azul	Moléculas CH
H	396,85	Violeta escuro	Cálcio ionizado
K	393,37	Violeta escuro	Cálcio ionizado

**Tabela 1 - Linhas absorção. Espectro solar determinado por Fraunhofer; identificando o elemento químico a partir do comprimento de onda (extraída de [21]).**



**Figura 2 - Amostra de espectros de estrelas revela que cada estrela tem seu espectro específico relacionado com sua temperatura (extraída de [22]).**

- Charles Joseph Messier (1730-1817) - Astrônomo francês. Em 1781 organizou o primeiro catálogo de nebulosas, com cerca de cento e dez objetos. Uma amostra que ficaria conhecida como Catálogo Messier.
- William Herschel (1738-1822) - Músico e astrônomo alemão. Foi o maior construtor de telescópios na virada do século XVIII e XIX. Enquanto observava e catalogava estrelas e seu brilho, concluiu que todo o Universo [23] conhecido era a própria Via Láctea (**Figura. 3**) possuía o formato de uma de lente e o Sol estava no seu centro, observou que o brilho aparente de uma estrela tem relação com a distância e que quanto mais distante menor deveria ser o seu brilho. Elaborou ainda um novo catálogo mais completo que o primeiro com mil nebulosas [24].



**Figura 3 - Desenho de Herschel representando a Via Láctea.  
(Extraído de [11])**

- 1784 John Goodricke (1764 -1786) - Astrônomo amador britânico. Goodricke observou uma estrela variável (a primeira) na constelação de Cepheus. Notou também que as variações no seu brilho ocorriam em um período de cinco dias: era a estrela Delta Cephei. Este tipo de estrela tornar-se-á uma vela padrão para o cálculo de distância. Uma estrela variável ou Cefeída é uma estrela gigante que pulsa, cujo brilho varia num determinado período de tempo.
- Jacobus Cornelius Kapteyn (1851 - 1922) - Astrônomo holandês. Elaborou um modelo de Universo posterior a Herschel que foi aceito como o melhor modelo pelos astrônomos no início do século XX. O Universo tinha a forma lenticular com diâmetro de 18000 parsec (pc) e espessura 3500 parsec (pc), a densidade maior de estrelas se encontrava no centro onde também estava o Sol.
- Ano de 1885 - Perto do centro da nebulosa de Andrômeda, uma estrela nova atingiu magnitude sete, cerca de um décimo do brilho de toda a nebulosa. O brilho da estrela nova (S Andromedae) levou os astrônomos aceitar a ideia que a nebulosa Andrômeda não estava fora do nosso sistema de estrelas. Uma vez que ela estivesse fora do nosso sistema de estrelas seu brilho deveria ser menor devido a maior distância. Esta estrela nova terá sua distância discutida no Grande Debate de 1920.
- Julius Scheiner (1858-1913) - Astrônomo alemão. Em 1899 em Potsdam [25] realiza o primeiro espectrograma de Andrômeda (M31) e observa linhas de

absorção como as do espectro solar, um fato importante que permitirá determinar velocidades radiais de galáxias utilizando o efeito Doppler.

#### **1.4 - Astronomia e as origens da Cosmologia Moderna.**

No século XX a Astronomia revelou a estrutura e o tamanho do Universo. A cosmologia moderna se consolida neste século e assume o papel de ciência que estuda a composição, estrutura e evolução do Universo. Num intervalo de 100 anos o nosso modelo de Universo que era estático se converte em homogêneo, isotrópico e com expansão desacelerada e por fim no final do século teremos um modelo homogêneo, isotrópico e com expansão acelerada.

- Heber Doust Curtis (1872 – 1942) – Astrônomo americano. No Observatório Lick com o telescópio refrator de trinta e seis polegadas, elaborou seus estudos sobre nebulosas espirais entre 1902 e 1920. Curtis será um dos palestrantes do Grande Debate de 1920.
- Harlow Shapley (1885 - 1972) - Astrônomo americano. Entre 1914 e 1921 determinou as distâncias de aglomerado globulares utilizando o telescópio refrator de 60 polegadas de abertura no Mount Wilson na Califórnia. Utilizou para o cálculo de distâncias a relação período-luminosidade de Cefeidas produzido por Henrietta Leavitt entre os anos de 1908 e 1912. Shapley verifica que aglomerados globulares são objetos distantes e considera importante então verificar se poderia ocorrer absorção da luz pelo meio interestelar. Consulta Jacobus Kapteyn sobre a possibilidade de absorção da luz pelo meio interestelar e foi informado que em nossa região da Via Láctea a absorção deve ser totalmente insignificante. Entretanto, a absorção não era desprezível de modo que os valores de magnitudes aparentes encontrados produziam distâncias incorretas. Durante o grande debate que ocorreu em 1920, Shapley que era o primeiro palestrante, apresentou seus cálculos de distâncias de aglomerados globulares infelizmente todos com valores superestimados.

- Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) – Astrônoma americana. Entre 1908 e 1912 ao catalogar um grande número fotografias astronômicas produzidas no Harvard College Observatory, nota uma relação entre o período das estrelas Cefeídas e sua luminosidade da pequena Nuvem de Magalhães. O diretor do Observatório Edward C. Pickering da Pickering (1846–1919) publicou em 1912, na circular de número 173 do Harvard College Observatory o trabalho de Henrietta Leavitt que ficou conhecido com a calibração de Cefeídas na pequena Nuvem de Magalhães. Henrietta produziu um método para medir distâncias utilizando uma Cefeída vela padrão.
- Willem de Sitter (1872-1934) - Matemático, físico e astrônomo holandês. Em 1908, se torna professor da Universidade de Leiden e em 1919, diretor do Observatório de Leiden onde, juntamente com Arthur Eddington, preparou a expedição para medir a deflexão gravitacional de raios de luz durante um eclipse total esperando comprovar a Teoria Geral da Relatividade de Einstein. O modelo de Universo de Sitter é uma solução estática a para as equações Einstein da relatividade geral. O Universo seria plano sem matéria[8] e permitiria movimento sem matéria.
- Vesto Melvin Slipher (1875-1969) – Astrônomo americano. Em 1912, estudando o espectro de Andrômeda observa um deslocamento das linhas de absorção para o azul (blueshift) para a nebulosa Andrômeda mostrando que ela se aproximava da Via Láctea com velocidade radial de  $300 \text{ km/s}$ . Até 1925 estudou espectros de quarenta e uma outras nebulosas notando um deslocamento das linhas de absorção para o vermelho (redshift). Assim, boa parte das nebulosas possuíam velocidade radial de afastamento de até  $1100 \text{ km/s}$  [19]. Velocidades radiais das galáxias são determinadas pela expressão do efeito Doppler (ver apêndice E). Slipher envia uma tabela com valores atualizados de velocidades radiais (até 1922) para Arthur Eddington publicar, em 1923, em seu livro [16]. Ele observou uma relação entre a distância e o deslocamento para o vermelho [19] (redshift).
- Albert Einstein (1879-1955) – Físico alemão. Em 1915 publicou a Teoria Geral da Relatividade (TGR). A nova teoria é uma generalização da teoria de gravitacional de Newton.

Einstein fundou a cosmologia relativística propondo um modelo estático e finito baseada na TGR. Para obter a solução estática, Einstein introduziu a chamada constante cosmológica ( $\Lambda$ ), responsável por uma força repulsiva contrapondo-se a gravidade da matéria.

- Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) – Físico inglês. Propôs em 1917 uma explicação para a variação da transparência da atmosfera da estrela Cefeída. Se a atmosfera se torna opaca ela retém calor e a estrela se expande. Todavia, se ocorre uma redução da opacidade permitindo que a luz escape, a atmosfera esfria e a estrela se contrai.
- Adriaan van Maanen (1884-1946) – Astrônomo holandês-americano. Em 1916, no Mount Wilson, utilizou a nebulosa espiral M 101 para determinar a velocidade tangencial de um ponto na borda de M101 (Galáxia do Cata-Vento) e encontrou 32.000 km/s, uma velocidade alta. A velocidade tangencial pode ser indicada em termos de unidades angulares, para uma velocidade alta o ângulo medido também será alto. Como a distância possui uma relação inversamente proporcional ao ângulo<sup>4</sup>, menor distância produz um ângulo maior portanto M 101 deveria estar à uma distância menor dentro da nossa Via Láctea. Se estivesse fora do nosso sistema sua velocidade deveria ser muito baixa o ângulo deveria ser pequeno logo a distância deveria ser maior.
- Alexander Alexandrovich Friedmann (1888-1925) – Cosmólogo e meteorologista russo. Nos anos de 1922 e 1924 utilizando as equações da Relatividade Geral obteve soluções cosmológicas expansionistas utilizando a Teoria da Relatividade Geral (TRG).
- Knut Emil Lundmark (1889 –1958) - Astrônomo sueco. Professor e diretor do observatório astronômico da Universidade de Lund entre 1929 e 1955. Knut defendia que nebulosas poderiam não pertencer à Via Láctea. Previu a distância de Andrômeda em cerca de 650 000 anos-luz. Durante a década de 1920 esteve

---

<sup>4</sup> Ver Distância 2 : Movimento Próprio no Capítulo 2

no Estados Unidos trabalhando nos observatórios Lick e Monte Wilson. Knut Lundmark também elaborou e publicou a sua classificação morfológica de galáxias. Retornando para a Suécia na década de 1930, se torna incentivador da astronomia onde participa de programas de rádio, falando de astronomia e história da ciência.

- Edwin Powell Hubble (1889-1953) - Astrônomo norte americano. No ano de 1914, após abandonar os estudos de direito para se tornar pesquisador no Observatório Yerkes, produziu uma classificação das nebulosas conhecidas, contemplando cerca de 17000 objetos. Após retornar da I Guerra Mundial, retomou sua vida de astrônomo no Observatório do Mount Wilson com o telescópio Hale, com diâmetro 1,5 metros recém construído, e inicia seus trabalhos seguindo os passos de Heber D. Curtis para determinar a distância da nebulosa de Andrômeda (M 31). Em 1923 obteve foto de uma estrela Cefeída nos braços de Andrômeda. Utilizando o Método das Cefeídas determinou uma distância de 1.000.000 de anos-luz confirmando a hipótese de Curtis, de que as nebulosas espirais não estão dentro da Via Láctea. Em seguida, juntamente com Milton Lasell Humason (1891- 1972), inicia um projeto para determinar as velocidades radiais e verificar que nebulosas espirais se afastavam da Terra e possuíam velocidades radiais proporcionais à sua distância. Hubble publicou este resultado em 1929 e causou um alvoroço no mundo acadêmico que sempre admitiu o Universo como sendo estático. Hubble apresentou uma nítida evidência de que o Universo se expande e os modelos expansionistas de Friedmann e Lemaître recebem uma confirmação.
- Georges-Henri Édouard Lemaître (1894-1966) – Cosmólogo e clérigo belga. Utilizando as equações da teoria geral da relatividade obteve soluções expansionistas em 1927. Para modelo de Universo em expansão, Lemaître demonstrou que as galáxias possuem velocidade radial de afastamento proporcional à distância (o redshift é proporcional à distância), calculou também [19] a taxa de expansão  $575 \text{ km / s / Mpc}$  [25]. Lemaître publicou seu trabalho na revista da Sociedade Científica de Bruxelas em 1927. Interessante observar que seu modelo está de acordo com o trabalho de Vesto Slipher, mas o artigo e o modelo de Lemaître ficaram esquecidos. O trabalho de Lemaître será publicado novamente em 1931 na Monthly Notices of Society (MNRAS) por solicitação de

seu editor. Esta tradução para o inglês e o prestígio da MNRAS tornou o trabalho de Lemaître conhecido. Lemaître propõe que o Universo teria surgido de um ponto superdenso e com temperatura infinita. O átomo primitivo se expande devido a uma explosão e se arrefece à medida que o volume aumenta.

# CAPÍTULO 2

## DISTÂNCIAS EM COSMOLOGIA

### 2.1 Introdução

Em cosmologia determinar distância sempre foi e permanecerá sendo um problema fundamental, uma vez que existe uma relação intrínseca envolvendo a metodologia, o desenvolvimento científico e as possibilidades tecnológicas da época em questão.

Aristarco empregou geometria básica para aferir distâncias para objetos próximos: Sol, Lua e alguns planetas. Entretanto, determinar distâncias das estrelas com os métodos por eles utilizada era tarefa impossível. Somente a partir da última metade do século XIX surgem novos métodos para determinar distâncias, iniciando com a paralaxe para estrelas próximas até métodos que utilizam vela padrão para calcular distâncias de estrelas, galáxias e aglomerados. Deste modo, a estrutura e o tamanho da Via Láctea e do próprio Universo foi aos poucos se revelando sob ação de métodos mais atualizados<sup>5</sup> para medir distâncias. E o que veremos neste capítulo distâncias cósmicas.

### 2.2 Distância 1 :Paralaxe trigonométrica

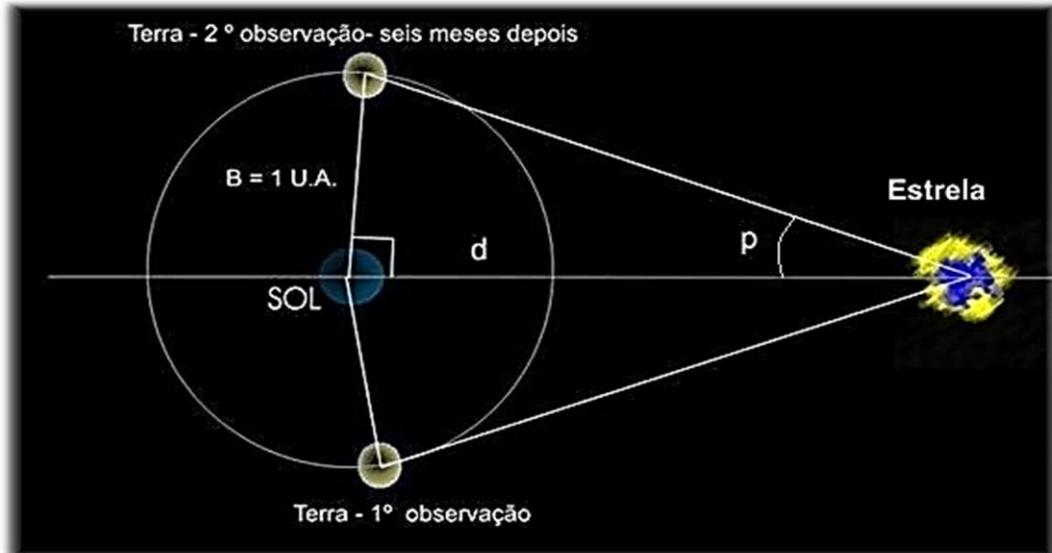
Em um intervalo de tempo muito grande da história da humanidade desde a antiguidade clássica até final do século XIX, para medir distâncias se utilizava a geometria. Este quadro vai se alterar rapidamente a partir de última metade do século XIX e nas primeiras décadas do século XX, uma vez que neste intervalo de tempo uma série de telescópios foram inaugurados, juntamente com a desenvolvimento da fotografia astronômica e de instrumentos e técnicas para medir distâncias.

No final do século XIX, quando telescópios melhores permitiram medir ângulos de paralaxe com confiança, foi possível então calcular distâncias de estrelas próximas. Entre os anos 1837 e 1838 Friedrich Wilhelm Bessel encontrou para estrela 61 Cygni uma distância de 10,4 anos-luz.

---

<sup>5</sup> Por exemplo, a recente detecção da radiação gravitacional em 2016 pode sugerir no futuro próximo, uma nova maneira de medir distância em Astronomia de acordo com B. Abbott et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).

Para ilustrar esta premissa, suponha que à medida que a Terra gira em torno do Sol, você observa uma estrela e fotografa a posição desta estrela; seis meses depois você volta a observar e fotografar a mesma estrela.



**Figura 4 - Órbita da Terra e o ângulo de paralaxe; ângulo p em segundos de arco, linha de base B distância média da Terra Sol e d distância até estrela.**

Considerando a distância Terra-Sol na **Figura 4** é possível mostrar que a distância em parsec ou ano-luz, são dados por:

$$(pc) = \frac{1}{p''} \quad (2.1)$$

$$D(\text{anos} - \text{luz}) = \frac{3,26}{p''} \quad (2.2)$$

A equação 2.1 determina a distância em parsecs, a equação 2.2 determina a distância em anos-luz, sendo o ângulo p em segundos de arco<sup>6</sup>.

Medir ângulos de paralaxe depende da linha de base. No nosso caso o raio de órbita da Terra. Para cálculo da paralaxe utilizamos a distância média da Terra ao Sol

<sup>6</sup> As demonstrações das equações 2.1 e 2.2 podem ser vistas no Apêndice A.

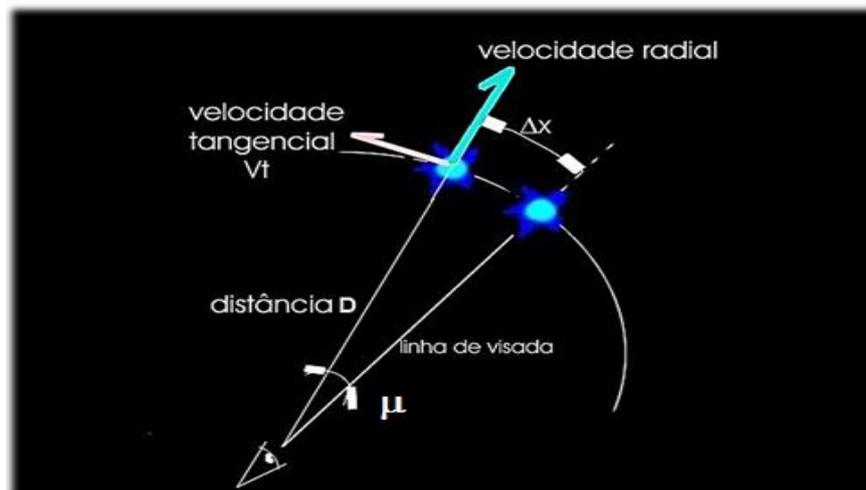
( $1,5 \cdot 10^8$  Km) ou uma unidade astronômica 1 U.A. Deste modo existe um limite para a distância a ser determinada até 96 anos-luz.

Entretanto nos anos 1980, dois satélites em órbita do Sol, com linha de base superior a um U.A.; os satélites Hiparco e Gaia mediram distâncias até 150 pc (489 anos-luz).

### 2.3 Distância 2: Movimento próprio

O método do movimento próprio para calcular distâncias dos corpos celestes, é também considerado como uma medida direta produzindo resultados confiáveis; porém não pode ser considerado um método seguro; ainda assim permite medir distâncias [26] até 100 pc ou 326 anos-luz o que permite conhecer somente as distâncias de estrelas próximas.

Um corpo celeste possui um movimento próprio no céu, portanto uma velocidade real que pode ser decomposta em duas direções: a velocidade radial na linha de visada se aproximando ou se afastando; e a velocidade tangencial ( $V_t$ ) na reta tangente a trajetória do corpo, portanto perpendicular à linha de visada (**Figura 5**).



**Figura 5 - Movimento próprio: velocidade tangencial ( $V_t$ );  $D$  distância até a estrela, comprimento do arco  $\Delta x$  em um intervalo de tempo  $\Delta t$  e  $\mu$  movimento próprio é indicado com unidades angulares ( $''/\text{ano}$ ).**

Consideraremos que a Terra está no centro da circunferência de raio  $D$  que também será à distância até o corpo celeste. Como o corpo percorre certo comprimento de arco  $\Delta x$  em um intervalo de tempo  $\Delta t = 1$  ano então utilizando a definição de

velocidade escalar e considerando o comprimento de arco  $\Delta x$  uma parte do perímetro de uma circunferência teremos:

$$V_t = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Se o perímetro da circunferência é  $2\pi.D$ , e o perímetro do arco é

$$\Delta x = V_t \cdot \Delta t \text{ então:}$$

$$\mu \cdot 2\pi.D = 2\pi.D \text{ se } V_t \cdot \Delta t = \Delta x \text{ então}$$

$$\mu = \frac{V_t}{D} \quad (2.3)$$

$$V_t = \mu \cdot D \quad (2.4)$$

Velocidade tangencial (movimento próprio) é indicada normalmente em termos de unidades angulares ("/ano).

Aplicando a equação 2.1 na equação 2.4 teremos:

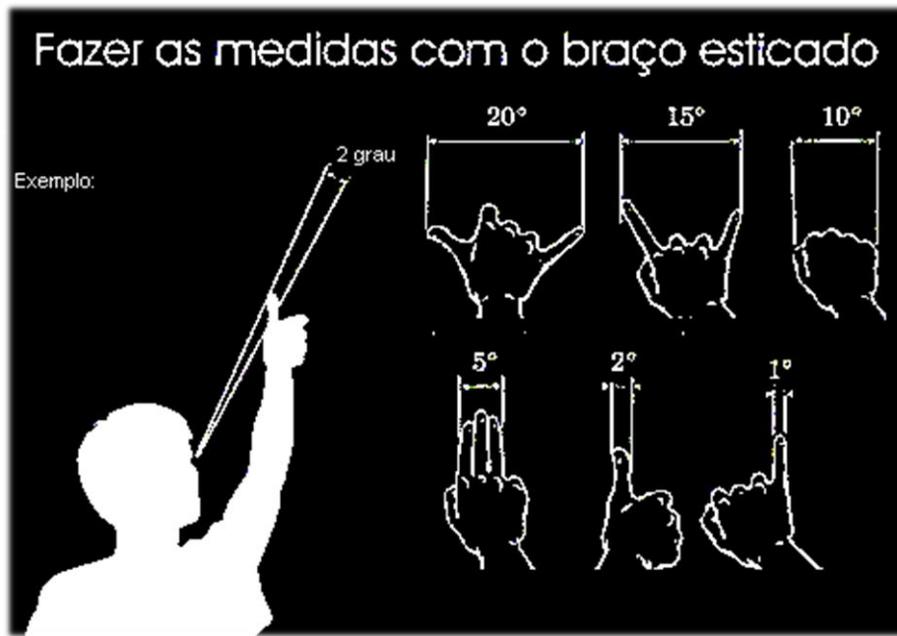
$$V_t = \frac{\mu(rad)}{p''} \text{ pc/ano} \quad (2.5)$$

Transformando parsec em km e ano em segundos teremos:

$$V_t = 4,74 \frac{\mu('')}{p''} \text{ km/s} \quad (2.6)$$

A equação 2.3 demonstra que se  $\mu$  tem um valor pequeno então à distância  $D$  será maior para um mesmo valor de velocidade tangencial. Astrônomos medem ângulos em graus, minutos de arco e segundos de arco. Lembrando que: 1 (grau) = 60'(minutos), 1'(minuto) = 60"(segundos) e 1 (grau) = 3600"(segundos). Um grau = 0,017 rads e um rad = 57,29 graus.

Vejamos como é possível efetuar medidas de ângulos como a mão (**Figura 6**)



**Figura 6 - Distâncias Angulares;  $1^{\circ} = 0,017$  rads, um rad =  $57,29^{\circ}$ ,  $1^{\circ} = 60'$ ,  $1' = 60''$  e  $1^{\circ} = 3600''$ .**

A Lua e o Sol apresentam um ângulo de  $0,5^{\circ}$  ou 30 minutos de arco,  $0,5^{\circ} = 30'$ .

Como observamos na **Figura 4** a velocidade radial (Vr) na linha de visada, se determina seu valor determinada utilizando efeito Doppler que apresentaremos mais adiante.

Distâncias determinadas pelos métodos da paralaxe e movimento próprio são precisos. O que não ocorre com outros métodos para determinar distâncias que mostraremos a seguir.

## 2.4 Distância: Vela padrão, Luminosidade, Fluxo e Magnitudes

Para distâncias maiores que 100 pc ou 326 anos-luz os astrônomos procuraram objetos celestes com alguma propriedade física conhecida, luminosidade, por exemplo, se for possível mostrar que está propriedade é própria, intrínseca do objeto então o objeto será considerado uma vela padrão sendo utilizado para o cálculo de distância.

Um exemplo de vela padrão são as estrelas Cefeídas que possuem relação entre sua luminosidade e seu período. Outro exemplo são alguns eventos de supernovas que quando explodem, possuem luminosidade bem conhecidas.

Chamamos de Luminosidade intrínseca (L) de um objeto celeste a quantidade total de energia em todas as direções em uma unidade de tempo, é possível entender como sendo a potência (P) emitida pelo objeto.

$$L = \frac{\Delta E}{\Delta t} = P \quad (2.7)$$

Entretanto à medida que a energia emitida (L) se propaga pelo espaço numa área esférica de raio crescente, a densidade de energia por unidade de área diminui até atingir o detector. Define-se fluxo (F) como sendo a potência recebida por unidade de área.

$$F = \frac{L}{\text{área}} = \frac{L}{4\pi d_L^2} \quad (2.8)$$

O instrumento utilizado para medir o fluxo é o fotômetro que converte energia luminosa em corrente elétrica. Conhecendo a luminosidade (L) podemos determinar a distância invertendo a equação 2.8.

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}} \quad (2.9)$$

Hoje utilizamos um sensor semicondutor para captação de luz conhecidos como CCDs (Charged Coupled Device) que são peças básicas na tecnologia de imagem digital utilizados por exemplo nas câmeras dos celulares.

O grego Hiparco (160-125 a.C.) elaborou uma classificação para o brilho das estrelas. Seguindo a tradição grega teremos uma disposição para magnitudes aparentes.

Magnitudes Aparentes	Objeto
-27	Sol
-13	Lua cheia
-5	Vênus no brilho máximo
0	Estrela Vega
3	Acrux estrela mais brilhante do cruzeiro do Sul
6	Limite olho humano
8	Limite dos maiores telescópios da Terra
12,6	Quasar mais brilhante
30	Limite telescópio de Hubble

**Tabela 2 - Magnitudes Aparentes; classificação de Hiparco**

Definindo magnitude aparente ( $m$ ) como sendo:

$$m = -2,5 \log F + \text{const} \quad (2.10)$$

Na equação 2.10, magnitude aparente está relacionada com o fluxo ( $F$ ) ou brilho aparente. Utilizando a classificação de Hiparco que atribuiu brilho aparente = 1 para estrelas mais brilhantes e brilho aparente = 6 para as mais fracas. Lembrando que Robert Pogson (1829-1891) mostrou que a percepção do brilho pelo olho humano possui uma escala logarítmica, assim uma estrela de magnitude um possui fluxo cem vezes maior que a estrela de magnitude 6, então:

$$m_1 = K \log F_1 + C \quad e \quad m_2 = K \log F_2 + C \quad se$$

$$m_1 - m_2 = K \log F_1 + C - K \log F_2 - C \quad assim$$

$$m_1 - m_2 = K [\log F_1 - \log F_2]$$

$$m_1 - m_2 = K \frac{F_1}{F_2}$$

$$\text{se } m_1 = 1, m_2 = 6 \text{ e } \log \frac{F_1}{F_2} = 100 \text{ então}$$

$$1 - 6 = K \log 100 - 5 = K \cdot 2 \text{ portanto } K = -2,5$$

$$m_1 - m_2 = -2,5 \frac{F_1}{F_2} \quad (2.11)$$

Utilizaremos a seguir a definição de magnitude absoluta (M) feita por Jacobus Cornelius Kapteyn (1851 - 1922): magnitude absoluta é o brilho que uma estrela deveria ter se ela fosse colocada a uma distância de 10 parsecs ou 32,61 anos-luz.

Assim encontraremos uma expressão para o cálculo de distância. Chamando:  $m_1 = m$  = magnitude aparente,  $m_2 = M$  = magnitude absoluta,  $F_1 = F(D)$  e  $F_2 = F(10 \text{ pc})$  e aplicando na equação 2.11, teremos:

$$m - M = -2,5 \log \frac{F(D)}{F(10 \text{ pc})}$$

Aplicando a definição de fluxo, teremos :

$$m - M = -2,5 \log \frac{10^2}{D^2} \quad \text{assim}$$

$$m - M = -2,5 [\log 10^2 - \log D^2]$$

$$m - M = -2,5 [2 - 2 \log D]$$

$$m - M = -5 + 5 \log D \quad (2.12)$$

ou aplicando a definição de logaritmo.

$$D (pc) = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \quad (2.13)$$

A equação 2.12 recebe o nome de módulo da distância, e a equação 2.13 é utilizada para o cálculo de distância (D) em parsecs (pc). Para distâncias em anos-luz: fazendo 10 pc = 32,61 anos-luz. Então teremos a equação 2.14

$$m - M = -2,5 \log \frac{32,61^2}{D(\text{anos} - \text{luz})^2} \quad \text{assim}$$

$$m - M = -2,5 [\log 1063,4 - 2 \cdot \log D(\text{anos} - \text{luz})]$$

$$m - M = -2,5 [3,03 - 2 \cdot \log D(\text{anos} - \text{luz})]$$

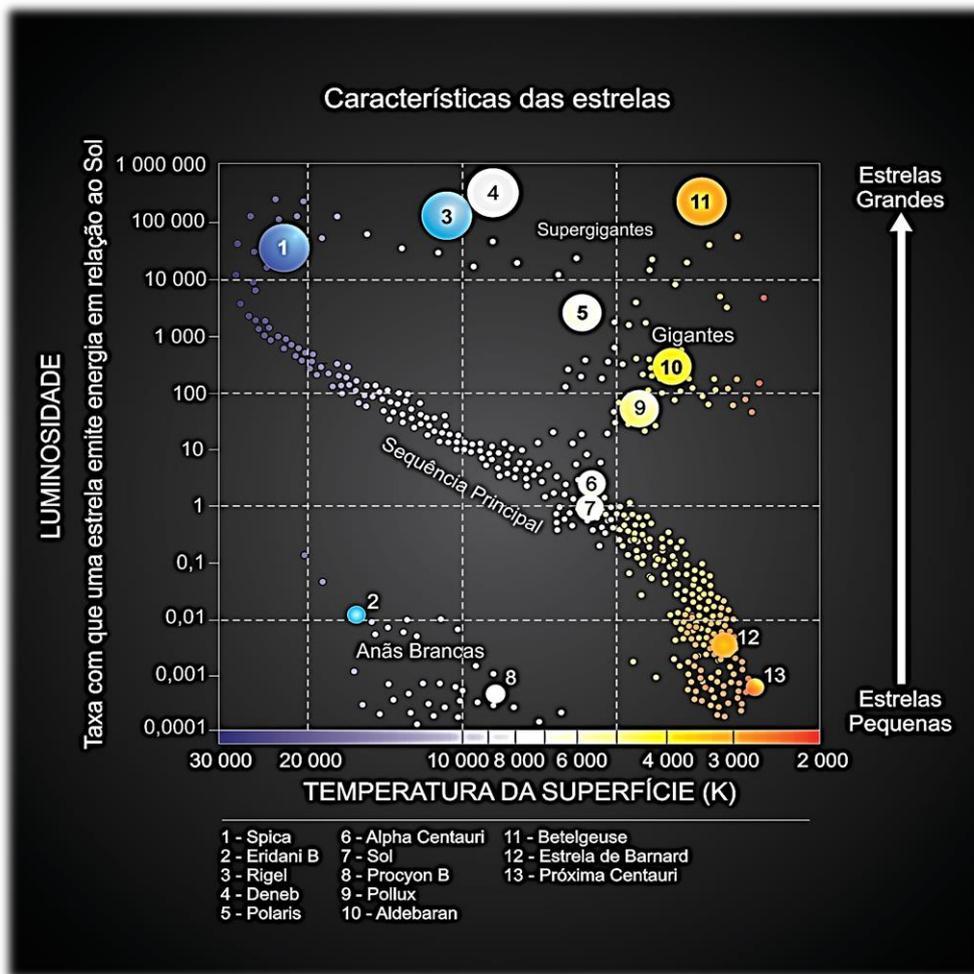
$$m - M + 7,5 = 5 \cdot \log D(\text{anos} - \text{luz}) \quad (2.14)$$

### 2.5 Distância 3: Paralaxe espectroscópica - Diagrama HR - Diagrama Hertzsprung-Russell

Em 1905, o astrônomo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967), constatou que a luminosidade das estrelas tende a diminuir quando o tipo espectral varia de O (cor azul) a M (cor vermelha), fato também observado pelo norte-americano Henry Norris Russell de forma independente. Eles produziram um gráfico (**Figura 7**) com a magnitude absoluta de uma estrela em função da temperatura (tipo espectral).

Estes diagramas, ficaram conhecidos como Diagrama Hertzsprung-Russell ou diagrama HR.

Em 1913 Henry Norris Russell (1887 – 1957) publicou o seu diagrama de espectro-luminosidade [27]. Com este diagrama (**ver apêndice B**) teremos informações das magnitudes absolutas (M), tipo espectral, temperatura, informações sobre os elementos químicos que formam as estrelas além de [27] calcular as distâncias.



**Figura 7 - Diagrama Hertzsprung-Russell conhecido como Diagrama HR; relação da magnitude absoluta em função da temperatura, ou tipo espectral (extraído de [28]).**

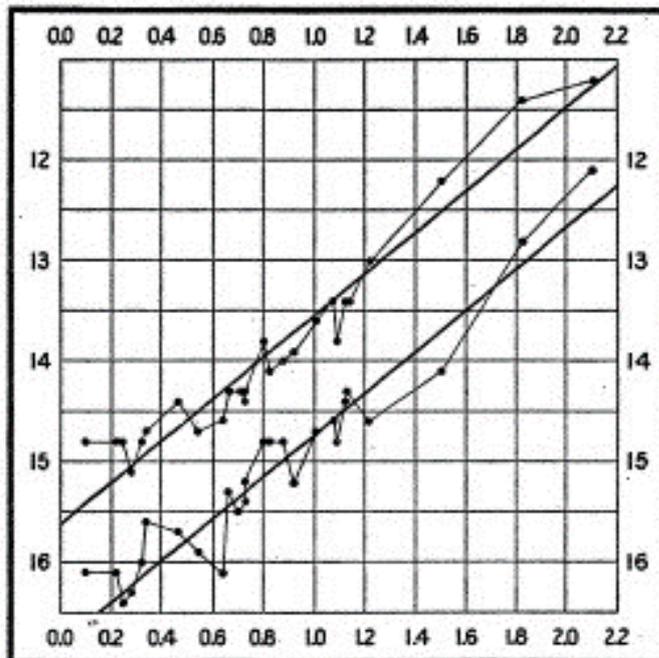
Inicialmente deveremos construir um diagrama HR de calibração (**Figura 7**). A determinação do espectro da estrela possibilita a classificação do seu tipo espectral (B, A, F, G, K ou M). Com a classificação obteremos a magnitude absoluta, com o fotômetro mediremos o fluxo (F) ou a magnitude aparente desta estrela e em seguida calcularemos a distância com a equação 2.13 ou 2.14.

A paralaxe espectroscópica torna possível determinar distâncias com segurança até 100.000 pc ou 320.000 anos-luz [26]. Deste modo poderemos determinar distâncias de estrelas mais distantes e aglomerados abertos um avanço considerável, pois com os dois outros métodos (paralaxe e movimento próprio) só se conheciam distâncias até estrelas próximas. Agora a estrutura da Via Láctea pode ser determinada com mais segurança.

## 2.6 Distância 4: Método das Cefeídas

Em 1890 Henrietta Leavitt entrou em um programa do Harvard College Observatory. Sua incumbência era examinar e catalogar chapas fotográficas além de realizar estudos fotométricos de estrelas variáveis, comparando chapas de uma mesma região do céu e procurando a variação do brilho de estrelas. Assim entre 1904 e 1905, Leavitt catalogou e estudou o período das vinte e cinco Cefeídas (RR Lyrae) na pequena Nuvem de Magalhães.

Segundo este trabalho, existe uma relação entre o logaritmo do período (P) da Cefeída e a sua magnitude absoluta (M).



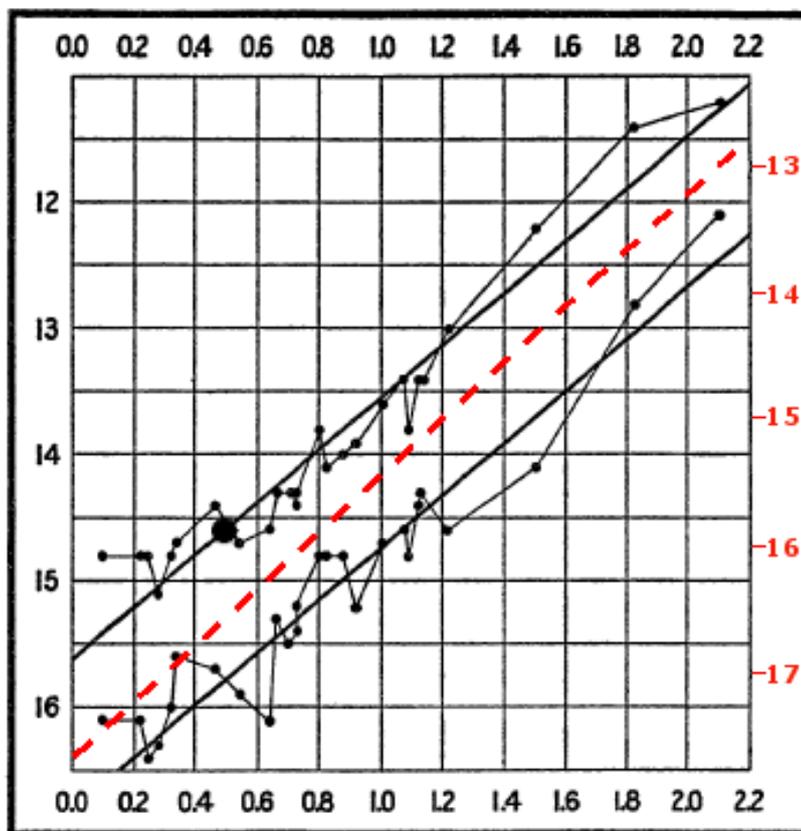
**Figura 8 - Gráfico original de Henrietta Leavitt; Relação entre o Período (P) da Cefeída e a sua Magnitude absoluta (M) (extraído de [28]).**

No gráfico da **Figura 8**, no eixo horizontal, temos o logaritmo dos períodos das Cefeídas e no eixo vertical temos as magnitudes absolutas. Assim teremos a equação:

$$M = -2,22 \log P \quad (2.15)$$

Leavitt logo percebeu que talvez fosse possível determinar distâncias. No entanto, o diretor do Observatório Edward C. Pickering lembrou que a função de Leavitt era obter dados e não os interpretar [19]. Pickering publica o trabalho da coletora de dados [28] na circular de número 173 do Harvard College Observatory em 1912.

Na verdade, a relação era entre a magnitude aparente e o período, uma vez que o fotômetro detecta o fluxo (magnitude aparente) e não era possível determinar as magnitudes absolutas. As distâncias até as Cefeídas eram desconhecidas. Deste modo o astrônomo Ejnar Hertzsprung procura por estrelas Cefeídas próximas cujas distâncias e períodos são conhecidos para obter suas magnitudes absolutas utilizando a equação 2.12. Assim foi possível calcular períodos com a equação 2.15 do trabalho de Leavitt e comparar com os períodos já conhecidos. Hertzsprung então realizou a calibração [29] da relação entre o período e a magnitude absoluta que obviamente continham erros sistemáticos na escala de magnitudes que pouco a pouco foram sendo ajustados. Na **Figura 9** temos, em vermelho à direita, a atual escala de magnitudes já corrigidas. A linha tracejada nos mostra valores muito próximos ao trabalho de Leavitt.



**Figura 9** – Gráfico de calibração da relação período, magnitude absoluta elaborado por Hertzsprung; a escala de magnitudes em vermelho à direita (extraído de [29]).

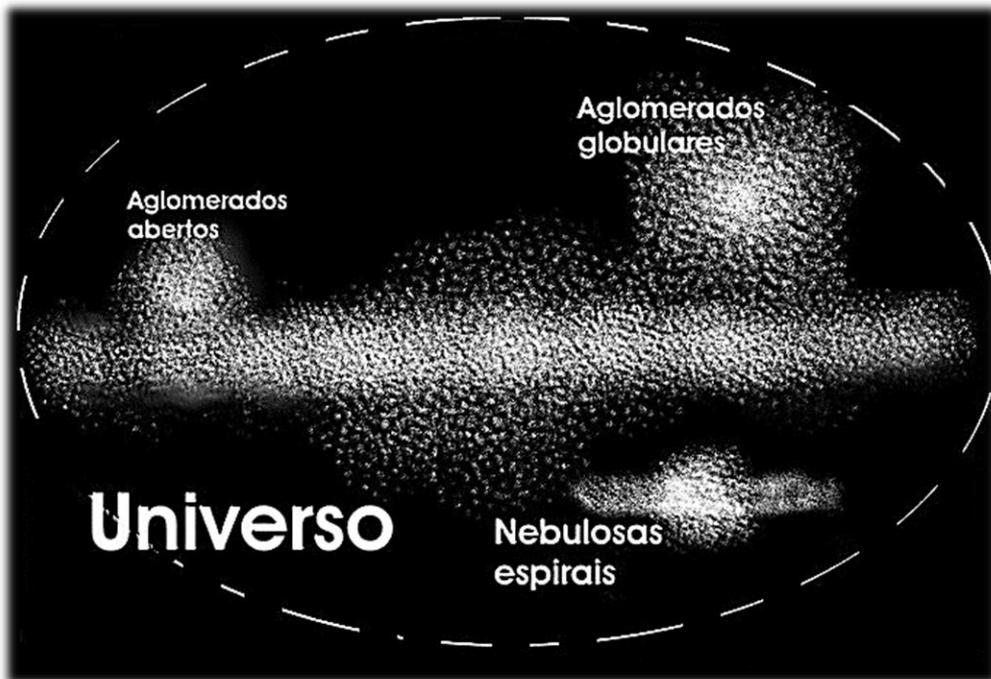
Definida a calibração da relação período x magnitude absoluta, foi possível calcular distâncias considerando as Cefeídas como Vela Padrão. Conhecendo o período, determina-se a magnitude absoluta, utilizando a equação 2.15. Com o fotômetro determina-se a magnitude aparente e calcula-se a distância utilizando a equação 2.13 ou 2.14. O método das Cefeídas nos permite determinar distâncias [26] até 4.000.000pc ou 13.046.255 anos-luz, chegando, deste modo, ao domínio das galáxias próximas.

# CAPÍTULO 3

## O GRANDE DEBATE

### 3.1 Introdução

Entre o final do século IX e início do século XX não se tinha certeza das dimensões da Via Láctea. Se considerava que a Via Láctea (**Figura 10**) era um disco formado por estrelas e que o Sol se encontrava no centro deste disco. Um grupo das nebulosas, cujas distâncias eram desconhecidas estariam em torno deste disco. Deste modo, o Universo era a própria Via Láctea que incluía o disco de estrelas, os aglomerados e as nebulosas espirais. Este era o panorama aceito até a segunda década do século XX.



**Figura 10 – O Universo no início do século XX era a própria Via Láctea**

Como apresentado no capítulo 1, o que ficou conhecido na literatura como “O Grande Debate”, foi uma conferência preparada para discutir a escala do Universo. Harlow Shapley deveria discutir o tamanho da Via Láctea considerando que aglomerados e nebulosas espirais se encontravam dentro da estrutura da nossa galáxia. Heber Curtis defendia o ponto de vista oposto, ou seja, que as nebulosas espirais se encontravam fora da estrutura da Via Láctea e que seriam Universos ilha. Posteriormente exporemos uma análise do debate e como o trabalho de Hubble calculando a distância da nebulosa de Andrômeda mostrou que as nebulosas espirais devem estar fora da Via Láctea encerrando definitivamente a dúvida não esclarecida por séculos, em particular, durante o Grande Debate.

### 3.2 A proposta do debate

Em 1919, em uma reunião da Academia Nacional de Ciências, em Washington, o diretor e fundador do Observatório de Monte Wilson, George Ellery Hale (1868-1938), propôs que se realizassem conferências anuais. A conferência de 1920 teria como temas: Universos ilha e a Relatividade. O secretário da Academia, C. G. Abbot (1872-1973) entretanto, logo apresentou sua opinião sobre a relatividade[31]:

"<sup>7</sup> Quanto à relatividade, devo confessar que prefiro ter um assunto no qual haveria meia dúzia de membros da Academia competentes o suficiente para entender pelo menos algumas palavras do que os oradores estavam dizendo se tivéssemos um simpósio sobre ele. Peço a Deus que o progresso da ciência envie a relatividade a alguma região do espaço além da quarta dimensão, de onde ela nunca possa voltar a nos flagelar. "

Hale tinha interesse no tema sobre a relatividade mas parece ter acolhido a rejeição de Abbot, que continuou o planejamento da conferência propondo o tema A Escala do Universo. Sugeriu também William Wallace Campbell (1862-1938), diretor do Lick Observatory e H. Shapley para discutirem o Universo ilha como sistema estelar independente da Via Láctea. A escolha de Campbell como palestrante deve-se aos trabalhos realizados no Observatório Lick sobre nebulosas espirais. Hale recebeu de Campbell uma cópia do volume sobre nebulosas espirais realizado por H.D. Curtis, trabalho este que Campbell classificou como sendo "esplêndidas contribuições" [31].

---

<sup>7</sup> "As to relativity, I must confess that I would rather have a subject in which there would be a half dozen members of the Academy competent enough to understand at least a few words of what the speakers were saying if we had a symposium upon it. I pray to God that the progress of science will send relativity to some region of space beyond the fourth dimension, from whence it may never return to plague us." [31]

Deste modo Heber D. Curtis seria o outro palestrante devido ao seu próprio trabalho com nebulosas espirais.

Em fevereiro, Hale recebeu um telegrama de Abbot comunicando o contato com Curtis sugerindo uma discussão entre ele e Shapley sobre A Escala do Universo, com um tempo de quarenta e cinco minutos cada um para expor seus pontos de vista<sup>8</sup>. Hale telegrafou para Shapley e Curtis, oferecendo um pagamento de \$ 150 para cada um [31].

Curtis, imediatamente escreve para Hale, alertando que quarenta e cinco minutos era um intervalo de tempo muito curto e em 3 março Hale responde a Curtis:

"If you or he wish to answer points made by the other, you can do so in the general discussion."... "willing to point out the weak places in his argument and the need for more results." [31]. Destacando e traduzindo livremente :

"Dispostos a apontar os pontos fracos em seu argumento e a necessidade de mais resultados.".As intenções do Sr. Hale ao enviar esta orientação para Curtis ficarão evidentes quando apresentarmos a seção 3.5 na sequência.

No entanto, a preocupação de Shapley era o resultado do debate com Curtis (que tinha experiência como orador público) e que poderia afastar Shapley da vaga da diretoria do Harvard College Observatory (em fevereiro de 1919 o antigo diretor Edward C.Pickering faleceu). Acontece que Shapley tinha escrito para Hale e para Russell (mentor de Shapley) anunciando sua intenção de se tornar o novo diretor. A resposta de Russel foi extremamente direta e honesta:

“<sup>9</sup>Para dizer a verdade nua, eu ficaria muito contente de ver você em uma boa posição em Harvard, livre de cuidados executivos. . . Mas eu não recomendaria você para o lugar de Pickering; e eu acredito que você cometeria o erro de sua vida se o tentasse o preencher. ”

Obviamente Shapley aceitou a proposta de Abbot. Curtis também concorda com a proposta da conferência. Portanto, definidos os participantes da conferência se iniciou uma troca de correspondências entre Curtis, Shapley, Hale e Abbot para decidir se deveriam realizar um debate ou uma discussão. Em 24 de fevereiro 1920 Hale escreve para Curtis, Shapley e Abbot aprovando o conceito de discussão. Finalmente em 26 de

---

<sup>8</sup> "I am wiring Heber Curtis suggesting Debate him and Shapley on subject scale of universe for Academy meeting forty-five minutes each suggest communicate Shapley and Curtis and wire if favorably arranged." [31]

<sup>9</sup> "To tell the naked truth, I would be very glad to see you in a good position at Harvard, free from executive cares. . . But I would not recommend you for Pickering's place; and I believe that you would make the mistake of your life if you tried to fill it." [31]

fevereiro, Curtis escreve para Shapley e Hale concordando com um debate não formal. Carta de Curtis para Shapley:

"<sup>10</sup> Concordo com você que não deve ser feito um "debate" formal, mas tenho a certeza de que poderíamos ser tão bons amigos se nos fizéssemos um ao outro ... Um bom amigável "scrap"<sup>11</sup> é uma coisa excelente de vez em quando; clarear o assunto. Poderia ser muito mais interessante para nós e para o nosso júri, apertar as mãos, metaforicamente falando, ...

Como já havia sido sugerido por Abbot, a conferência deveria discorrer sobre "A Escala do Universo", sendo que o tópico de Shapley seria mostrar que o tamanho da Via Láctea era maior do que se acreditava. Para ele, deveria haver cerca de 300.000 anos-luz, além de discutir a estrutura da nossa galáxia. Curtis trataria das nebulosas espirais como Universos ilha, sistemas estelares fora da Via Láctea.

Entretanto Shapley, não sem motivos, ficou preocupado, uma vez que astrônomos de vários observatórios estarão na conferência e uma discussão poderia levar a uma crise. Propõe então fazer uma exposição para o público em geral não para cientistas. Além disso, um membro do comitê do observatório de Harvard estaria na palestra e propôs um almoço com Shapley sobre um compromisso em Washington.

Assim Shapley escreve a Russell em 31 de março:

"<sup>12</sup> Professor Brown estará na conferência; também Professor Frost. Eles, bem como as pessoas do Lick e do Monte Wilson, parecem considerar essa discussão como uma crise para as teorias astrofísicas mais recentes ... Mas, crise ou não, estou solicitando falar para o público em geral de não-cientistas que possam estar presente. Consequentemente, qualquer que seja a resposta para Curtis e sua escolha deve ser feita na discussão. Escrevo isto porque você pode estar interessado em saber qual é a situação, e para que você possa estar pronto para defender seus próprios pontos de vista se forem

---

<sup>10</sup>I agree with you that it should not be made a formal "debate", but I am sure that we could be just as good friends if we did go at each other "hammer and tongs". . . . A good friendly "scrap" is an excellent thing once in a while; sort of clears up the atmosphere. It might be far more interesting both for us and our jury, to shake hands, metaphorically speaking, at the beginning and conclusion of our talks, but use our shillelahs in the interim to the best of our ability." [31].

<sup>11</sup> De acordo com <http://michaelis.uol.com.br/busca?id=7KYRz> scrap pode ser entendido como luta.

<sup>12</sup> Professor Brown is here at the observatory; also, Professor Frost. They, as well as the people at Lick and at Mount Wilson, seem to regard that coming discussion as a crisis for the newer astrophysical theories.... But, crisis or not, I am requested to talk to the general public of non-scientists that may happen to drop in. Consequently, whatever answer must be made to Curtis and his school must be made in the discussion. I write you this because you may be interested in knowing what the situation is, and so that you may be ready to defend your own views if they are imposed upon by either of us. To make matters worse for me, Mr. Agassiz of the Harvard Obs. Visiting Committee is coming down to the lecture and to eat a lunch with me; and A.L.L. himself has written for an appointment in Washington." [31].

impostos porá qualquer um de nós. Para piorar as coisas para mim, o Sr. Agassiz do comitê do Observatório de Harvard está vindo para a palestra e para um almoço comigo. Ele próprio escreveu para um encontro em Washington. ”

Russell vem socorrer seu aluno sugerindo se tornar um terceiro autor em uma versão publicada da conferência, versão a ser publicada em julho. [31]. Enquanto Curtis já se preparava, pretendendo apresentar seu tópico através de uma série de slides datilografados. Ele escreveu a Shapley:

"<sup>13</sup> Estou enviando uma cópia da minha palestra em Washington. Isso irá lembrar-lhe as linhas gerais dos argumentos utilizados .... Infelizmente, a maior parte do meu argumento real foi mostrado na forma de slides datilografados; eu não tenho nenhuma cópia destes a enviar-lhe em agora ...”

Shapley sabe então que Curtis irá apresentar seriamente seus argumentos. Alguns destes slides sobreviveram no Observatório de Allegheny e serão apresentados mais adiante, durante a exposição de Curtis. Como vimos, era consenso que deveria se fazer uma conferência. Entretanto, na literatura, prevaleceu a ideia de um grande debate. Convém lembrar que para os funcionários dos dois grandes observatórios californianos a conferência se tornou um duelo entre os campeões. Acrescente a isto que se discutiriam evidências e interpretações conflitantes muito importantes para a época.[31].

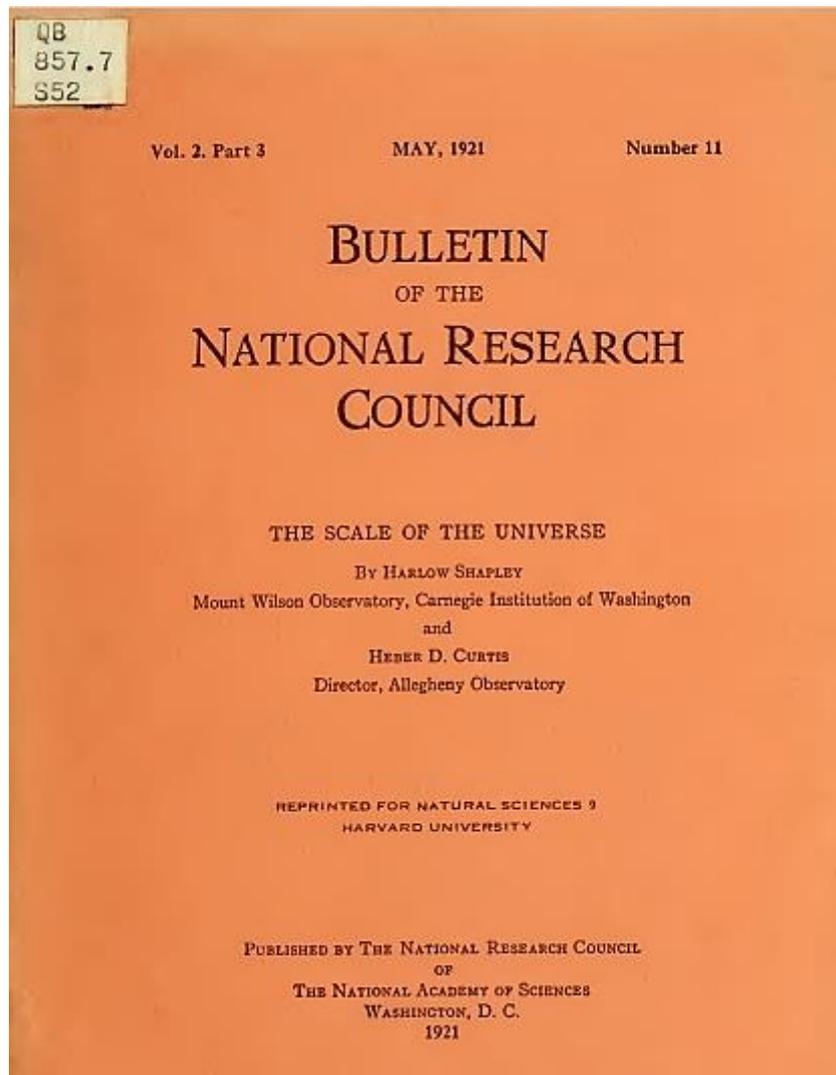
O Grande Debate ocorreu em 26 de abril de 1920 na Academia de Ciências de Washington, Harlow Shapley discutiu o tamanho da Via Láctea e Heber Curtis as nebulosas espirais (Universos ilha), Curtis mostrou que nebulosas espirais (Universos ilha) não se encontravam em nosso sistema de estrelas. De acordo com as palavras de Curtis “A evidencia hoje aponta fortemente para a conclusão de que as espirais são galáxias individuais, ou Universos ilhas, comparáveis em dimensão e número de componentes individuais à nossa própria galáxia”. No entanto Shapley argumentava “Me parece que a evidencia é oposta a que as espirais sejam galáxias de estrelas comparáveis à nossa própria galáxia. Até o presente não há razão para modificarmos a hipótese tentativa de que as espirais são simplesmente objetos nebulosos” [32].

O debate foi publicado em um boletim (**Figura 11**) em maio de 1921 É importante também citar o artigo de Michael A. Hoskin [31], publicado em 1976 que apresenta

---

<sup>13</sup> “I am sending with this a copy of my talk at Washington. This will recall to you the general lines of the arguments used.... Unfortunately, most of my actual argument was shown in the form of typewritten slides; I have no copy of these to send on to you at present. . .” [31]

informações sobre a preparação do Grande Debate além de destacar a apresentação de Curtis durante o evento.



**Figura 11 - The Scale of the Universe, Capa do Boletim contendo as apresentações de Shapley e Curtis (extraído de [34]).**

### 3.3 Harlow Shapley - O primeiro tópic: O tamanho da Via Láctea

O primeiro palestrante, Harlow Shapley, concentrou-se na parte do debate que incluía os itens:

- Evolução da ideia do tamanho galáctico
- Pesquisando a vizinhança solar
- Sobre as distâncias dos aglomerados globulares
- As dimensões e disposição do sistema galáctico



**Figura 12 - Harlow Shapley**

Shapley abordou as distâncias de aglomerados abertos, globulares e nebulosas espirais e qual a relação destas distâncias com o tamanho da Via Láctea.

Como relação aos aglomerados abertos, Shapley apresentou um levantamento do que já era conhecido [34] sobre tais sistemas. Lembrou que Henry Russell, Jacobus Kapteyn, Arthur Stanley Eddington e Benjamin Boss produziram o diagrama HR para algumas de nebulosas; Hyades: grupo da Ursa maior; grupo da 61 Cygni e o grande grupo Scorpius. E determinaram a distância para o grupo Hyades (600 anos-luz ou 184 pc), para aglomerado de Hercules Messier 13 que Shapley acreditava ser 35.000 anos-luz.

Considerou que os aglomerados abertos se encontram próximos ao disco de estrelas da Via Láctea, e que o aspecto de um aglomerado estelar [34] diferia de um aglomerado globular.

Já para mostrar as distâncias dos aglomerados globulares Shapley utilizou basicamente seu trabalho iniciado em 1914 no Observatório de Mount Wilson que foi publicado em 1917 [32] (ver apêndice C). O astrônomo determinou as distâncias de aglomerado globulares utilizando o método das Cefeidas fundamentado no trabalho de Henrietta Leavitt [28], escolhendo as vinte e cinco estrelas mais brilhantes de cada aglomerado, onde os valores das magnitudes são os valores médios. As distâncias dos aglomerados globulares deste trabalho foram apresentadas no Grande Debate [34] (**Figura. 13**).

Cluster	Distance in light-years	Mean photographic magnitude of brightest 25 stars	
		Apparent	Absolute
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:

**Figura 13- Distâncias de aglomerados globulares obtidas por Shapley, utilizando o método das Cefeidas (extraído de [34]).**

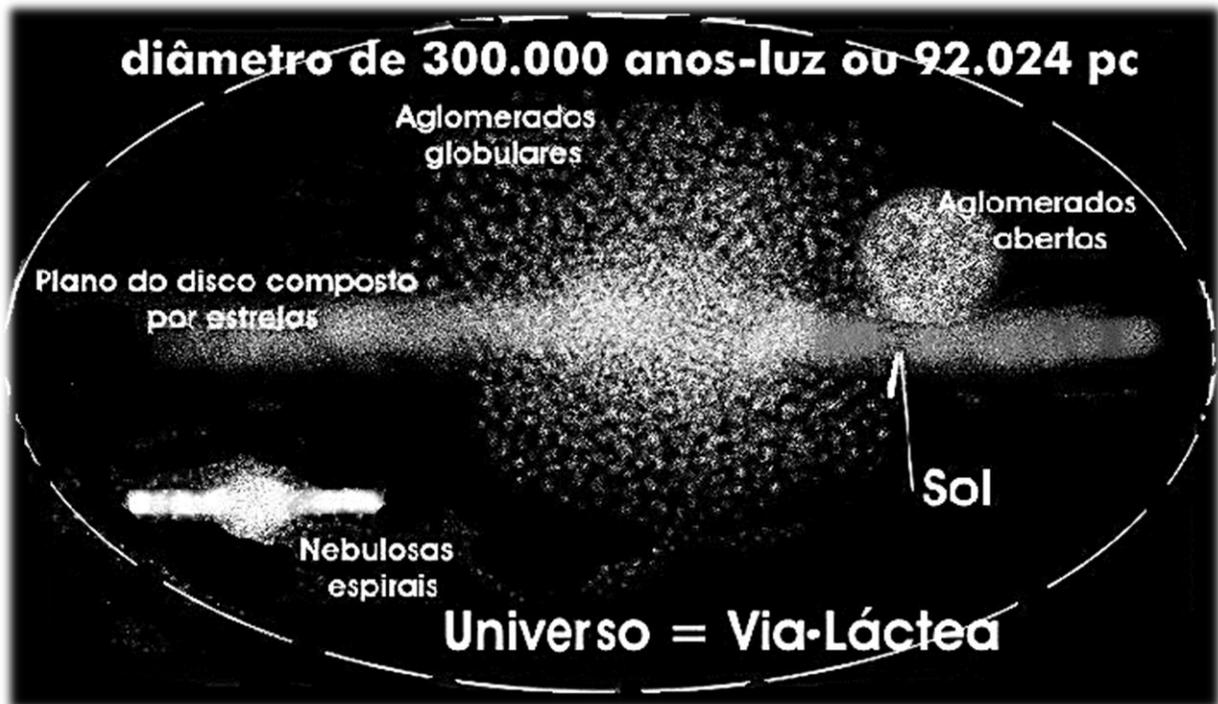
O trabalho no observatório de Mount Wilson revelou que os aglomerados globulares estão distribuídos em uma esfera cujo centro coincide com o centro da Via Láctea, portanto, o plano galáctico não possui aglomerados e o mais distante se encontravam a 60.000 pc ou 195,7 anos-luz. Segundo Shapley a Via Láctea tinha diâmetro de 92.024pc ou 300.000 anos-luz e os aglomerados globulares eram elementos da Via Láctea. Para as nebulosas espirais, Shapley apresentou dois trabalhos para defender sua opinião.

Em primeiro lugar, o trabalho de Adrian van Maanen (ver apêndice D) que mediu a rotação de M 101 e encontrou uma velocidade tangencial (movimento próprio) com um valor muito alto, resultado que foi confirmado para as nebulosas M 81 e M 31.

Shapley argumentou que, como foi possível medir o movimento próprio as nebulosas espirais como M 101, M81 e M31 estas deveriam estar dentro da nossa Via Láctea, pois quanto menor a distância maior deveria ser o movimento próprio (ver equação 2.3).

O segundo, foi o trabalho do astrônomo Scares [31] que elaborou duas fotos da nebulosa espiral Messier 51, a galáxia do Redemoinho, (NGC 5194) onde não se observava estrelas, apenas uma nebulosidade difusa que, de acordo com Shapley, M51 deveria estar dentro da Via Láctea. Desta forma Shapley argumentou que nebulosas espirais (Universos ilha) eram parte integrante da Via Láctea.

O Universo segundo Shapley era própria Via Láctea (**Figura 14**). Podemos dizer que ele defendia com relação as nebulosas uma posição conservadora que sobreviva desde o renascimento, embora também representasse um avanço no conhecimento da Via Láctea.



**Figura 14 - Universo de Harlow Shapley, nebulosas espirais são objetos componentes da Via Láctea**

Infelizmente as distâncias calculadas por Shapley estavam superestimadas o que colaborou para uma avaliação do diâmetro da Via Láctea muito maior do que o real. Entretanto, o trabalho de Shapley mostrou, pela primeira vez, qual era a estrutura da Via Láctea e que o Sol não estava no centro do sistema.

### 3.4 Heber D. Curtis - O segundo tópico: A existência dos Universos ilha

O segundo palestrante, Heber D. Curtis, ocupou-se da segunda parte do debate que incluía os itens:

- Dimensões e estrutura da galáxia
- Evidência fornecida pela magnitude das estrelas
- As nebulosas espirais como galáxias externas

Heber Curtis defendeu a existência dos Universos ilha tendo que encontrar argumentos para afastar, o máximo possível, as nebulosas espirais ou para diminuir o tamanho da Via Láctea.



**Figura 15 - Heber D. Curtis**

De acordo com Curtis a Via Láctea teria um diâmetro de 9.202,4 pc ou 30.000 anos-luz e uma espessura em torno de 1.534 pc ou 5.000 anos-luz. Observa-se que o diâmetro é dez vezes menor que aquele proposto por Harlow Shapley que era de 92.024 pc ou 300.000 anos-luz.

Os aglomerados abertos e globulares estão na Via Láctea como quaisquer outros objetos celestes, exceto as nebulosas espirais (Universos ilha) cujas distâncias deveriam ser superiores ao diâmetro da Via Láctea.

Curtis apresentou seus argumentos utilizando os slides datilografados [31] e identificados em uma ordem de A até J<sup>14</sup>. Os slides encontram-se no Observatório de Allegheny.

Slide [A] THE SIZE OF OUR GALAXY; OLDER VIEW - O tamanho da nossa galáxia; visão antiga

Curtis defendeu um diâmetro da nossa galáxia máximo de 30.000 anos-luz e apresentou cálculos de alguns astrônomos para sustentar seu ponto de vista, pois os valores são próximos:

1. Wolf 14.000 anos-luz
2. Eddington 15.000 anos-luz
3. Shapley 20.000 anos-luz
4. Newcomb entre 7000 anos-luz e 30.000 anos-luz
5. Kapteyn 60.000 anos-luz
6. Shapley (1915) 20.000 anos-luz.

Slide [B] THE SHAPE OF OUR GALAXY OF STARS – A forma da nossa galáxia.

Neste slide, Curtis apresentou qual seria a estrutura da nossa galáxia. As estrelas não possuem uma distribuição uniforme e não existe um número infinito de estrelas. Nossa galáxia possuía bilhões de sois, a Via Láctea tem uma forma de lente sendo que a espessura deve ser um sexto do diâmetro e o Sol deveria se encontrar próximo do centro do sistema. As estrelas se encontrariam concentradas num disco contendo o centro do sistema, portanto, a nossa posição neste disco, dificultaria estudar a forma da galáxia, embora ela pareça assemelhar-se a uma espiral.

---

<sup>14</sup> É possível que Curtis tenha utilizado até o slide H uma vez que o tempo de 45 minutos impedia mais slides.

Slide [C] THE SIZE OF OUR GALAXY; SHAPLEY'S VIEW – O tamanho da nossa galáxia; a visão de Shapley.

Curtis mostrou que os resultados do trabalho de Shapley para determinar as distâncias dos aglomerados globulares e para os aglomerados mais distantes determinaram 220.000 anos luz reforçando a hipótese de Shapley de que a Via Láctea possuía diâmetro de 300.000 anos-luz.

Slide [D] THE STARS OF THE MILKY WAY - As estrelas Via Láctea.

Para que o diâmetro da Via Láctea fosse menor do que o proposto por Shapley Curtis propôs então quais os valores possíveis de magnitudes aparente de estrela para uma determinada distância (**Tabela 3**).

Magnitude aparentes	Correspondentes magnitudes absolutas para distâncias	
	10.000 anos-luz	100.000 anos-luz
8	- 4,4	- 9,4
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

**Tabela 3 - Magnitudes aparentes para estrelas da Via Láctea segundo Curtis extraído de [31].**

Slide [E]

Neste slide Curtis questionou a utilização das estrelas Cefeídas como vela padrão uma vez que não existia garantia de que todas as estrelas Cefeídas se comportariam da mesma maneira para qualquer ponto do Universo. Ele apresentou um estudo sobre o número das estrelas Cefeídas:

- Total de Cefeídas no céu (sem as dos aglomerados globulares) seria de 1686.
- Nos aglomerados globulares:  
NGC 5272 137 Cefeídas,  
NGC 3293 nenhuma Cefeída  
NGC 4755 também nenhuma Cefeída.
- 45 Cefeídas com curto período foram encontradas em todo o céu.
- Nas nuvens de Magalhães, o número de Cefeídas seria de 1800.
- Para Curtis, as Nuvens Magalhães poderiam ser regiões do espaço únicas no Universo.

Slide [F] THE SPECTRUM OF SPIRAL NEBULAE – O espectro das nebulosas espirais.

Curtis analisa os espectros de nebulosas espirais:

- Como sendo Universos ilha (objeto fora da Via Láctea). Não seria possível distinguir o espectro da nebulosa espiral de um espectro de um grupo de estrelas. O espectro da nebulosa espiral seria semelhante ao espectro da Via Láctea. Deste modo espectro das nebulosas espirais não apresentariam evidências que desacreditem a hipótese dos Universos ilha
- Como fenômenos galácticos (objeto dentro da Via Láctea).

Considerando as nebulosas espirais como objetos da nossa galáxia, então elas deveriam ser constituídas de matéria fina, de gás e não deveriam existir estrelas. Entretanto, o espectro das nebulosas apresentavam aspectos que se relacionavam com espectros de estrelas. Estrelas onde não poderia haver estrelas.

Slide [G] THE DISTRIBUTION OF THE SPIRAL NEBULAE - A distribuição das nebulosas espirais.

Curtis argumentou que nebulosas espirais seriam encontradas nos polos da nossa galáxia região onde existem um número pequeno de estrelas, mas não seriam encontradas no plano da galáxia onde é grande número de estrelas.

Como as espirais são objetos da galáxia que não se encontram no plano da galáxia, então alguma força deve ter repellido as espirais do plano da galáxia. Curtis descartou uma possível força repulsiva e afirmou que espirais eram objetos que estavam fora da Via Láctea.

Slide [H] NEW STARS IN THE SPIRAL NEBULAE – Novas estrelas nas nebulosas espirais.

Curtis sabia que vinte e cinco estrelas novas foram descobertas em nebulosas espirais, sendo que dezesseis na Nebulosa de Andrômeda, e trinta na Via Láctea e na nossa própria galáxia.

Considerando as informações da última nova da Andrômeda: magnitudes aparentes entre + 17 e +15, magnitudes absolutas entre + 3.1 e - 3.9 e determinou as distâncias entre 20.000 anos-luz e 500.000 anos-luz.

Curtis considerou então que a nebulosa espiral de Andrômeda estava fora da Via Láctea, uma vez que para Shapley a Via Láctea tinha diâmetro de 300.000 anos-luz e, para Curtis, 30.000 anos-luz.

[J] THE SPIRAL NEBULAE AS ISLAND UNIVERSES - As nebulosas espirais e os Universos ilha.

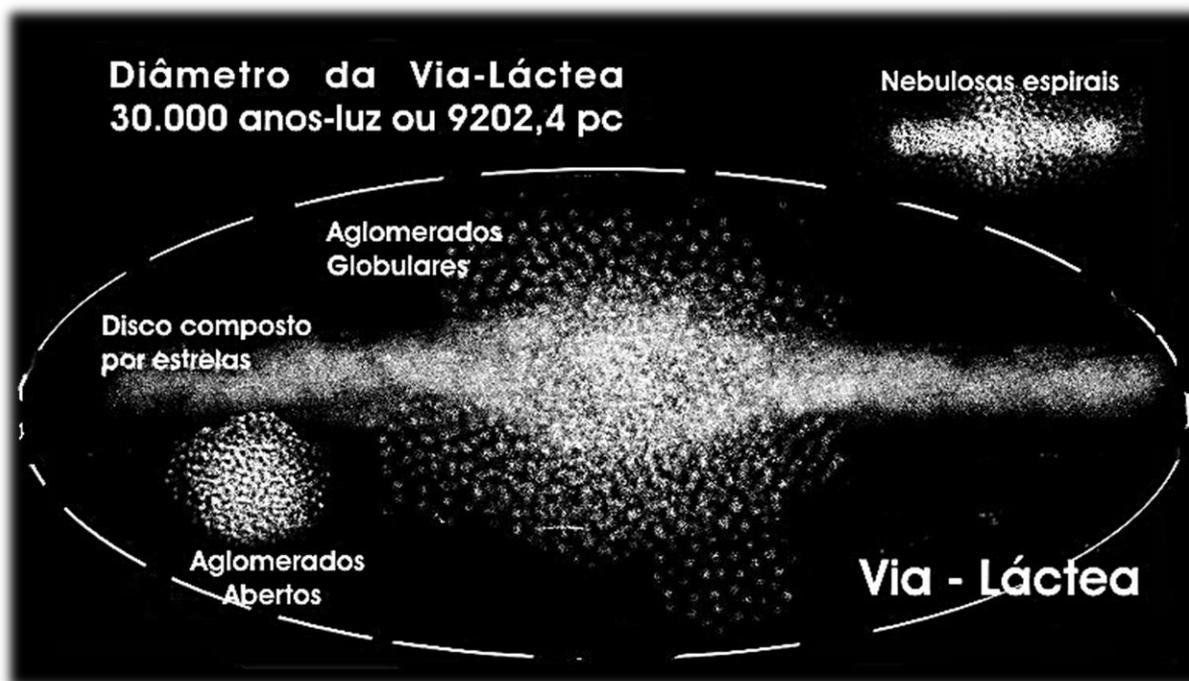
Por fim, num resumo de tudo que foi apresentado, Curtis alertou que assumir nebulosa espiral como Universo ilha permite:

- a. Não utilizar a teoria de evolução estelar nas espirais.
- b. Não seria necessário arranjar as velocidades das espirais com as velocidades médias das estrelas.
- c. Que o espectro das espirais seria similar ao espectro de um grupo de estrelas
- d. Podemos assumir que a nossa galáxia pode ser uma espiral. Nebulosa de Andrômeda se encontra a 500.000 anos e as galáxias mais distante a 10.000.000 anos-luz.
- e. Que as nebulosas espirais teriam o mesmo tamanho da nossa galáxia.

Curtis argumentou que existia um erro médio de 0.006" [34] no movimento próprio anual, assim as estrelas próximas teriam velocidades de 10 a 30 km/s, os aglomerados globulares 3.000 km/s, e as nebulosas espirais 1.200km/s.

Além disto como utilizou paralaxe para cálculo de distância de aglomerados e estrelas, Curtis alertou [34] ainda que as linhas de base utilizadas para o cálculo eram muito pequenas. Igualmente como considerou também muitas estrelas para encontrar um valor médio da magnitude, argumentou que isto provocaria uma dispersão no valor da magnitude comprometendo o cálculo das distâncias.

Na **Figura 16**, apresentamos o universo proposto por Curtis.



**Figura 16 - Universo de Heber D. Curtis, nebulosas espirais são objetos que se encontram fora da Via Láctea**

### 3.5. Analisando o Grande Debate

No início do século XX determinar distâncias foi fundamental para se elaborar um modelo cosmológico coerente com os dados observacionais. Vamos relembrar os métodos e a quais as distâncias possíveis para cada método.

Primeiro método	paralaxe trigonométrica	distância até 30 pc ou 96 anos-luz.
Segundo método	movimento próprio	distância até 100 pc ou 326 anos-luz.
Terceiro método	paralaxe espectroscópica	distância até 100.000 pc ou 320.000 anos - luz.
Quarto, método	Quarto método das Cefeidas	distância até 4.000.000 pc ou 13.046.255 anos-luz.

**Tabela 4 - Métodos para determinar distâncias e seus respectivos limites**

Para se determinar distâncias de objetos mais afastados, com distância maior do que 100 pc ou 326 anos luz, se utilizou basicamente, dois métodos: da paralaxe espectroscópica e das Cefeídas como vela padrão. Estes dois métodos necessitam das magnitudes aparentes para o cálculo, mas existiam alguns problemas para se determinar as magnitudes aparentes:

1. Em alguns casos se utilizava a média das magnitudes aparentes das estrelas de um aglomerado. Deste modo se produzia uma dispersão no cálculo da magnitude aparente.
2. Existia um limite para se medir magnitudes aparentes das estrelas muito fracas, devido aos instrumentos de observação.
3. A absorção da luz pela matéria interestelar não foi levada em conta para determinar as magnitudes aparentes, uma vez que Shapley admite que em nossa região da Via Láctea a absorção deve ser totalmente insignificante

Shapley utilizou o método das Cefeídas para avaliar a distância dos aglomerados globulares e aceitou os trabalhos de Russell, Kapteyn, Arthur Eddington e Benjamin Boss que utilizaram o método da paralaxe espectroscópica, para cálculo de distâncias de estrelas e dos aglomerados abertos. Nos dois métodos se utilizam as magnitudes aparentes o que produz erros nos cálculos de distâncias.

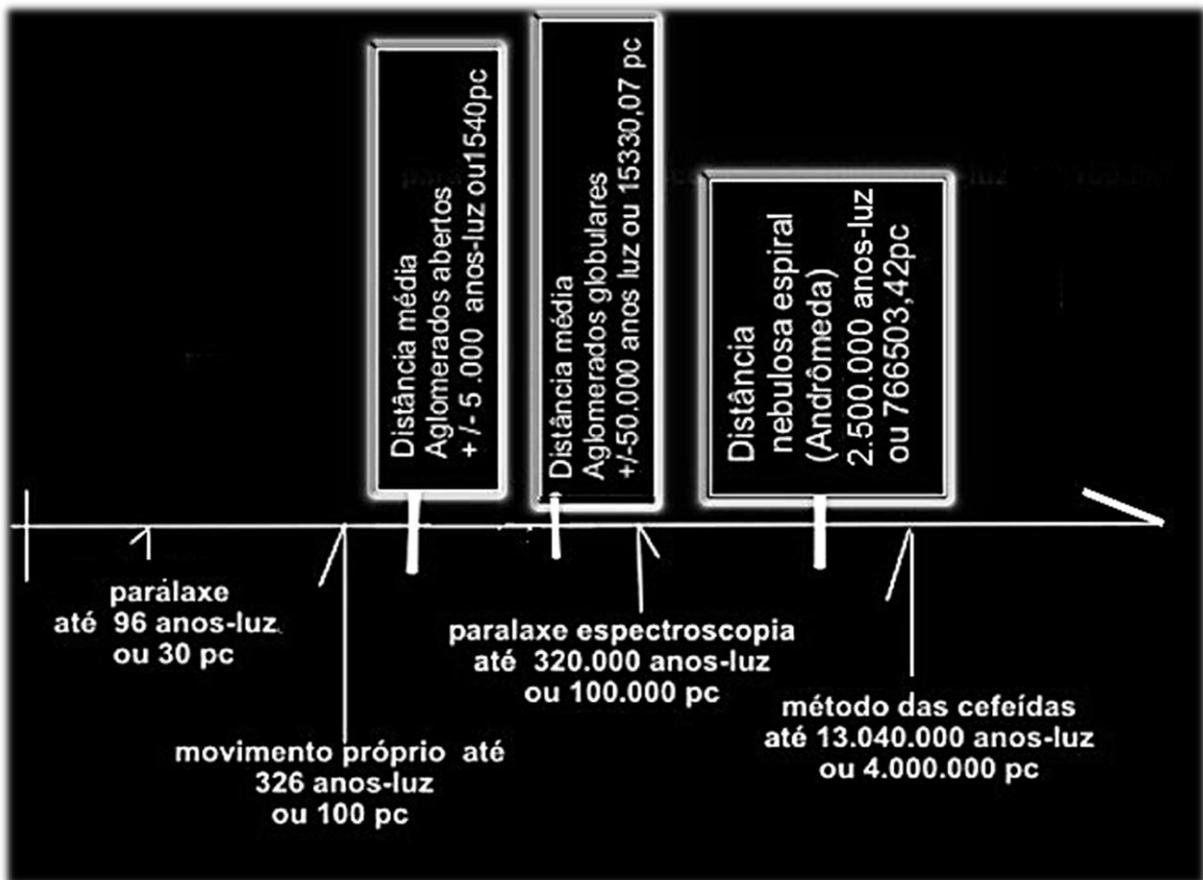
Infelizmente Shapley superestimou as distâncias dos aglomerados globulares. Veja a Tabela 5.

<b>Aglomerado Globular</b>	<b>Distância de Shapley</b>	<b>Distância atual</b>
Messier 13 Hércules	36.000 anos-luz	25.100 anos-luz
Meisser 3	45.000 anos-luz	33.900 anos-luz
Meisser 5	38.000 anos-luz	14.500 anos-luz
Omega Centauri	21.000 anos-luz	15.800 anos-luz

**Tabela 5 - Distâncias de Aglomerados Globulares de acordo com Shapley**

Curtis procurou mostrar erros nos cálculos das distâncias em geral. Entretanto ele também cometeu um erro quando utiliza a magnitude aparente da estrela nova de Andrômeda e avaliou sua distância entre 20.000 anos-luz e 500.000 anos-luz, uma distância muito pequena. Observando a **Figura 17** notamos que a distância de Andrômeda é 2.500.000 anos-luz. Se Curtis tivesse utilizado método das Cefeídas para avaliar a distância de Andrômeda, a ambiguidade do Grande Debate estaria encerrada. Utilizar Cefeídas como vela padrão era um procedimento muito recente além do que o próprio Curtis havia questionado o método no slide E durante o Grande Debate.

Observamos que o grande debate apenas mostrou um sério problema existente na astronomia da época, ou seja, que as distâncias encontradas ainda eram imprecisas. Não era possível demonstrar com razoável grau de confiança qual dos dois modelos de Shapley ou Curtis estava correto.



**Figura 17 - Escala de distância - Métodos para determinar distâncias e seus respectivos limites**

Considero importante relembrar a carta resposta do diretor George Ellery Hale para Curtis em 3 março:

"If you or he wish to answer points made by the other, you can do so in the general discussion."... "willing to point out the weak places in his argument and the need for more results." [31]

Destacando a tradução:

"Dispostos a apontar os pontos fracos em seu argumento e a necessidade de mais resultados."

Com isso, o comentário do Sr. Hale sugere o motivo do Grande Debate ser inconclusivo.

### 3.6. Encerrando a ambiguidade do Grande Debate

Entre 1922 e 1926, no Observatório do Monte Wilson, Hubble<sup>15</sup> interessado no estudo das nebulosas, propôs um sistema de classificação morfológica para nebulosas. Na época eram conhecidos cerca de 15000 objetos (**Figura 19**).

Uma primeira classificação de galáxias foi publicada em 1922. Outra publicação ocorre em 1926, e uma nova versão foi publicada em 1927. A classificação definitiva (ver **Figura 20**) foi publicada em 1936 [18].

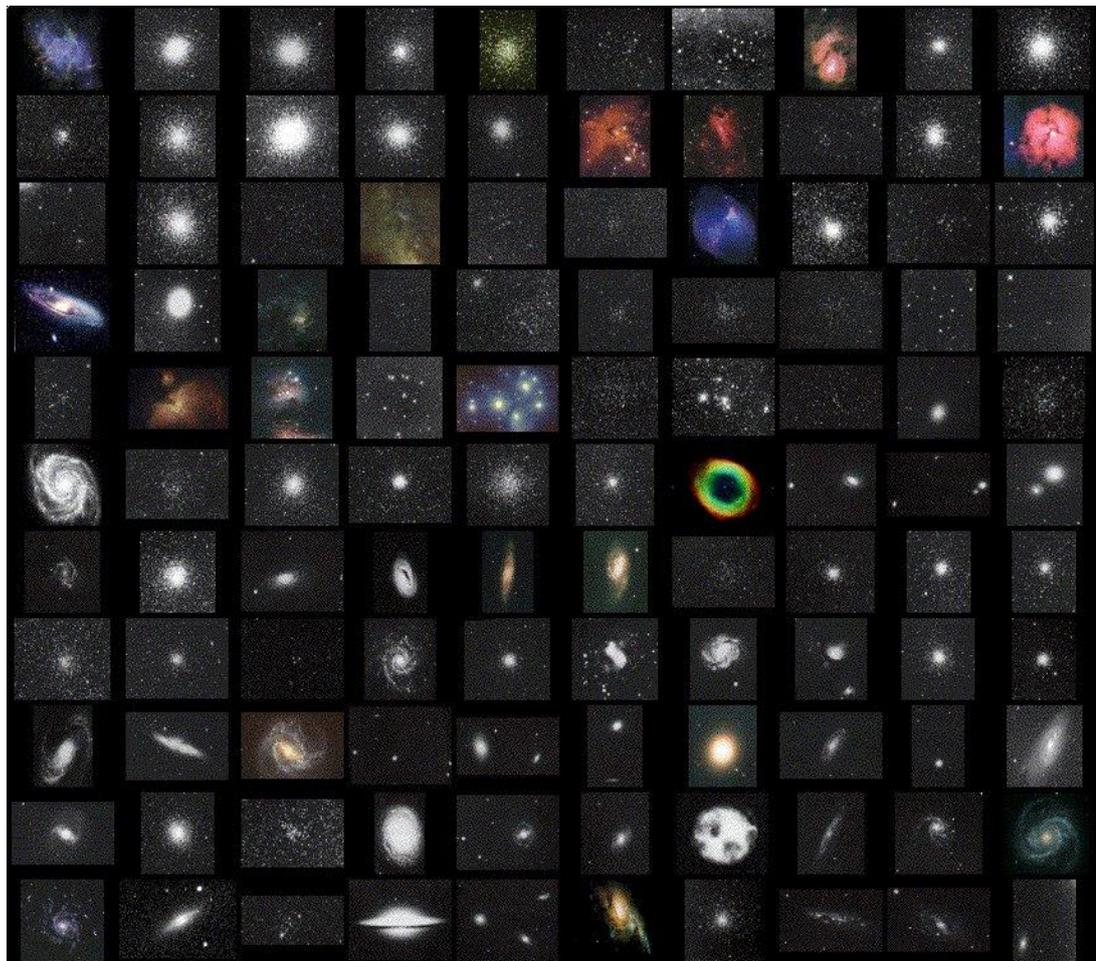
O sistema de classificação morfológica de galáxias ficou conhecido como diagrama "*fork*" e também foi publicado pelo astrônomo sueco Knut Lundmark em 1926, meses antes da publicação de Hubble.

---

<sup>15</sup> É interessante mencionar que Hubble inicialmente estudou Direito na Universidade de Chicago em 1910, e posteriormente abandonou o direito pela Astronomia. Hubble participou da I Guerra Mundial. Quando retornou aos Estados Unidos em 1919 começou a trabalhar no Observatório do Monte Wilson com o telescópio Hooker de 2,5 m recém construído (ver também cap. 1) .

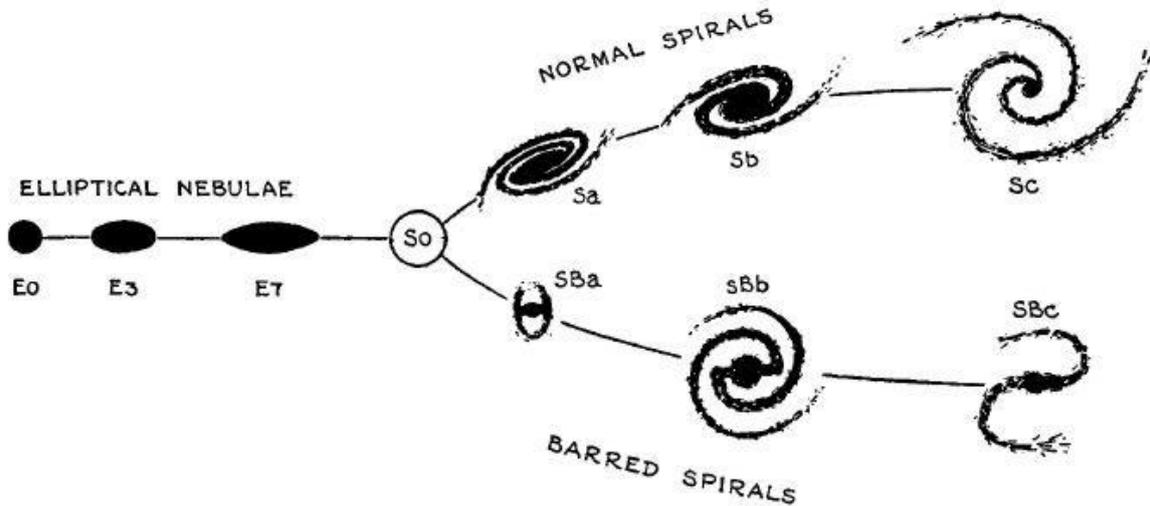


**Figura 18 - Edwin Powell Hubble**



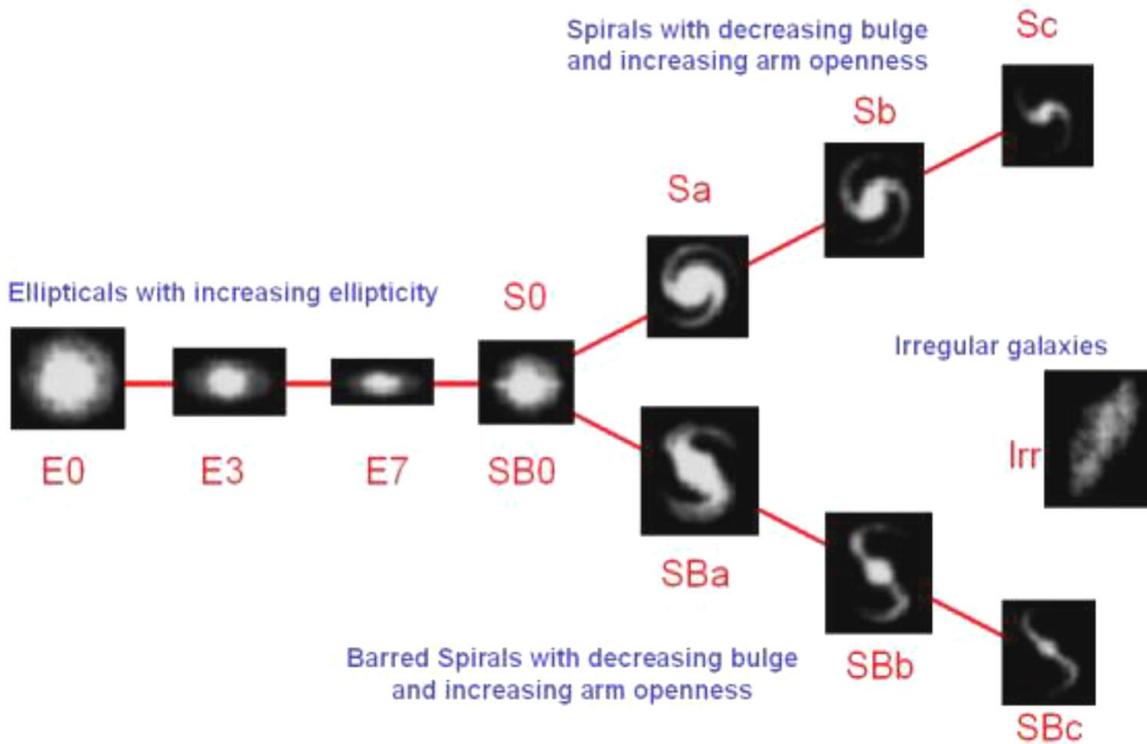
**Figura 19 - Amostra de Nebulosas - 15 000 nebulosas foram catalogadas até 1908 (extraído de [35]).**

Hubble realiza sua classificação morfológica (ver **Figura 20**)



**Figura 20 - Classificação de nebulosas. Diagrama “fork” proposto por Hubble (extraído de [18]).**

Uma classificação morfológica (**Figura 21**) mais atual.



**Figura 21- Classificação de nebulosas atualizada. Confrontando com o diagrama original de Hubble notamos novos tipos de galáxias (extraído de [36]).**

A descoberta de galáxias Sculptor e Fornax, por Shapley, em 1938, que eram anãs esferoidais (dSph), mostra que classificação morfológica de Hubble estava incorreta. Uma outra classe de galáxias, muito luminosas que foram identificadas, eram elípticas gigantes [36].

Após o Grande Debate, o diâmetro do nosso sistema estelar continuava sendo uma dúvida. Para Shapley, o diâmetro da Via Láctea era u 300.000 anos-luz e para Curtis o diâmetro da Via Láctea era 30.000 anos-luz. O diâmetro proposto por Curtis era dez vezes menor, permitindo as nebulosas espirais estarem fora do nosso sistema estelar enquanto para Shapley as nebulosas espirais eram parte integrantes da Via Láctea.

Hubble, que iniciou seu trabalho como astrônomo estudando as nebulosas, se propõe calcular a distância de nebulosas continuando o trabalho de Curtis, que utilizou a estrela nova de Andrômeda para calcular a distância de Andrômeda (M 31).

Como todas as estrelas novas possuem a mesma luminosidade  $L$  no pico da explosão então poderiam ser utilizadas como vela padrão. Hubble desenvolveu então um projeto para encontrar explosão de estrelas novas em Andrômeda (M 31). Seu trabalho seria fotografar regiões da galáxia de Andrômeda noite após noite por vários anos, comparando as fotografias de um dia com o dia seguinte, esperando encontrar uma estrela nova registrando assim a luminosidade  $L$  no pico da explosão.

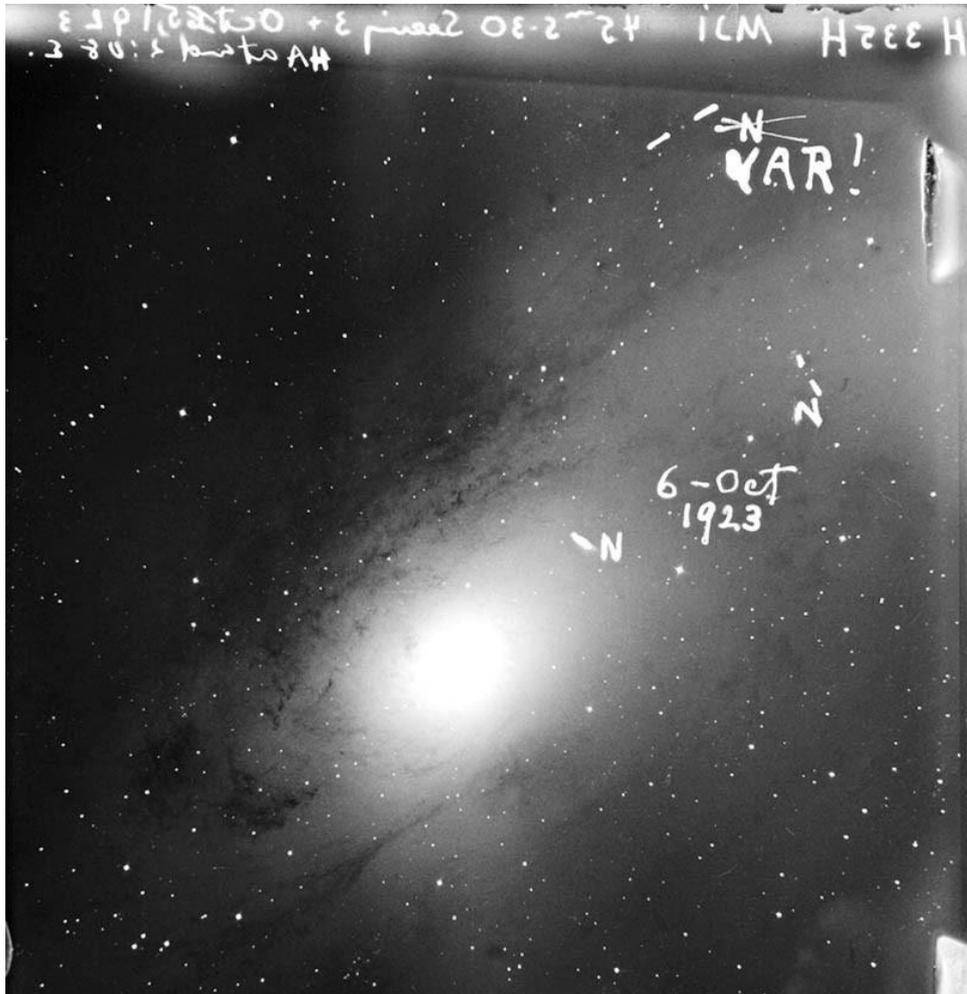
Para sua sorte, logo no início dos trabalhos, nas primeiras fotos do dia 6 outubro de 1923, nos braços da nebulosa espiral de M 31, Hubble encontra o que poderia ser uma estrela nova. A estrela observada por Hubble teve a magnitude aparente variando de 19,2 até 18 e em seguida retomado a 19,2 em 31,4 dias, portanto, a hipótese de ser uma estrela nova foi descartada, uma vez que uma estrela nova explode devido ao colapso gravitacional do seu núcleo, seu brilho aumenta rapidamente até atingir um pico máximo e em seguida diminuir até praticamente se extinguir. O que Hubble observou foi uma estrela variável.

Hubble então utilizou o trabalho de Henrietta Leavitt que estudou o período de Cefeída na pequena Nuvem de Magalhães [28].

Segundo este trabalho, existe uma relação entre o logaritmo do período ( $P$ ) da Cefeída e a sua magnitude absoluta ( $M$ ), de acordo com a equação 2.15.

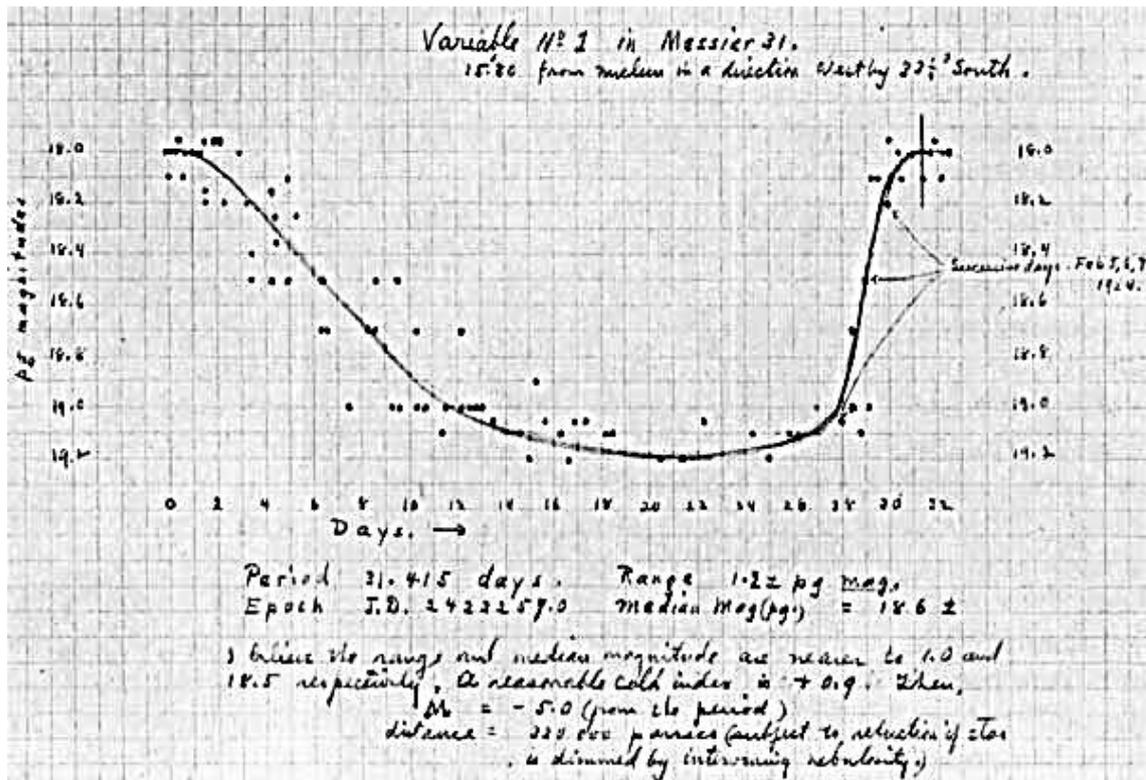
$$M = -2,22 \log P \quad ( 2.15 )$$

Portanto, a foto do dia 6 outubro de 1923 feita por Hubble, (**Figura 21**) revelou uma estrela variável, como o próprio Hubble suspeitava como se observa na figura, por ele nomeada de "VAR".



**Figura 22 - Imagem da Cefeída em Andrômeda (M31) observada por Hubble com telescópio Hooker observe a data 6- oct 1923 (extraído de [37]).**

Hubble elaborou o gráfico da **Figura 23** que mostra a variação da magnitude aparente em relação tempo. A magnitude aparente variou de 19,2 até 18 e retornou a 19,2 num intervalo de 31,4 dias.

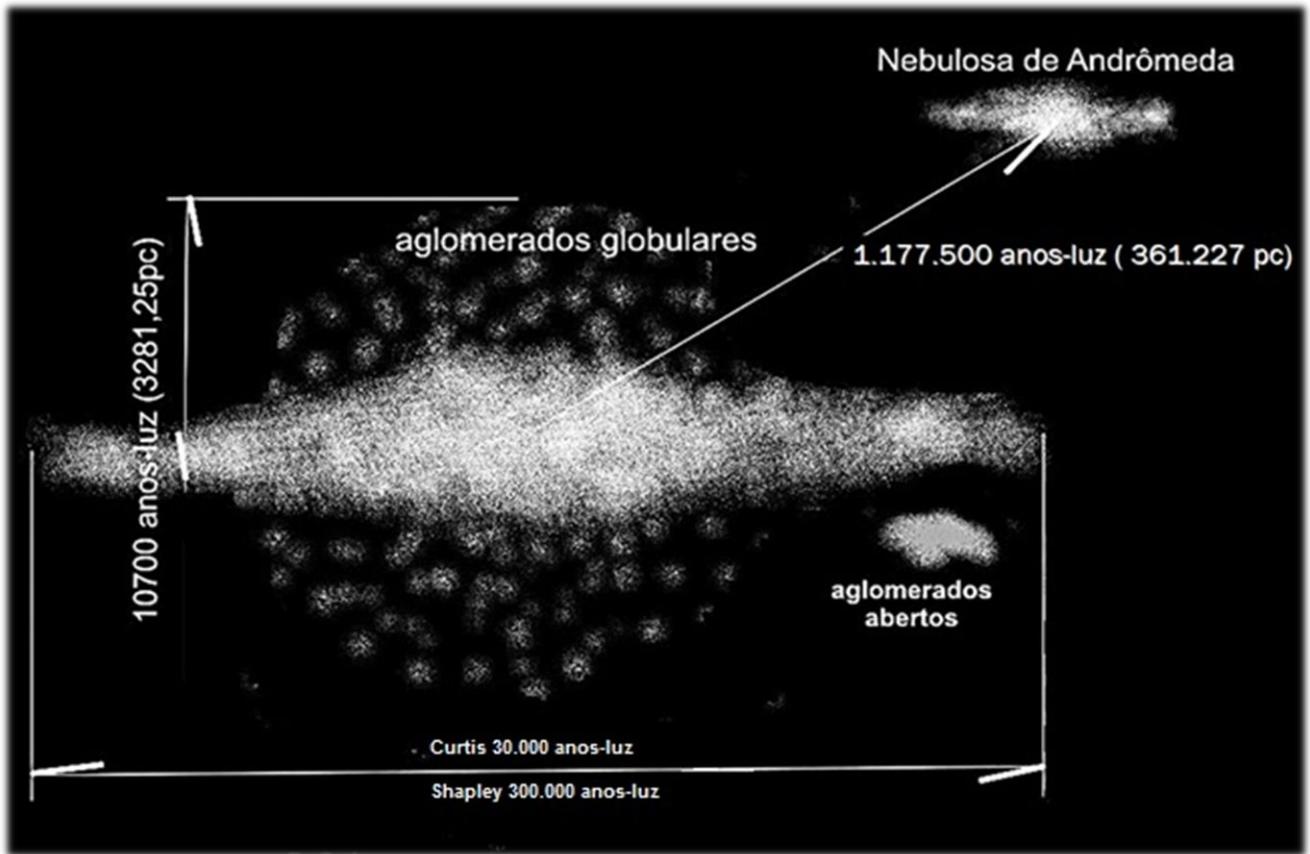


**Fig 23 - Gráfico mostrando a variação da luminosidade da Cefeída em M31 elaborado por Hubble . (extraído de [37])**

A estrela variável observada por Hubble recebeu o número 1 pois ele estudou mais Cefeídas em Andrômeda (M 31). Com período de 31,415 dias e uma magnitude aparente de  $m = 18,2$ , utilizando a equação 2.15, determina  $M = 3,33$  e aplica o resultado na equação 2.13 ou 2.14 obtendo 361.227 pc. Em fevereiro de 1924 Hubble comunica Shapley “ [32] Você se interessará em ouvir que encontrei uma variável Cefeída na nebulosa de Andrômeda (M31). ... em anexo segue uma cópia da curva de luz que, mesmo grosseira, mostra de forma inquestionável as características de uma Cefeída. .... Usando o valor de Seares ... a distância obtida possui valor acima de 300.000 parsecs.”

O trabalho de Hubble mostra claramente que as nebulosas espirais eram sistemas de estrelas que estão fora da Via Láctea (**Figura 23**) contrariando o modelo de Harlow Shapley onde a Via Láctea tinha diâmetro 92.024pc ou 300.000 anos-luz. O Universo defendido por Heber D. Curtis deixa de ser uma hipótese.

As questões discutidas no Grande Debate: qual era o tamanho da Via Láctea e a existência dos Universos ilha (nebulosas espirais), se encerra com a descoberta da Cefeída na nebulosa de Andrômeda por Hubble.



**Figura 24 - Universo de Hubble**

Hubble termina suas investigações no Observatório do Mount Wilson e publica os resultados em um artigo intitulado “Cepheids in Spiral Nebulae” [38]. Neste artigo apresenta os valores tabelados para vinte e duas Cefeidas na galáxia do triângulo M33 (**Figura 25**) e doze Cefeidas na nebulosa de Andrômeda M31 (**Figura 26**).

TABLE I.  
CEPHEIDS IN M 33.

Var. No.	Period in Days	Log. P	Photographic Magnitudes	
			Max.	Min.
30	46.0	1.66	18.35	19.25
3	41.6	1.62	18.45	19.4
36	38.2	1.58	18.45	19.1
31	37.3	1.57	18.30	19.2
29	37.2	1.57	18.55	19.15
20	35.95	1.56	18.50	19.2
18	35.5	1.55	18.45	19.15
35	31.5	1.50	18.55	19.35
42	31.1	1.49	18.65	19.35
44	30.2	1.48	18.70	
40	26.0	1.41	19.00	
17	23.6	1.37	18.80	
11	23.4	1.37	18.85	
22	21.75	1.34	19.00	
12	21.2	1.33	18.80	
27	21.05	1.32	18.85	
43	20.8	1.32	18.95	
33	20.8	1.32	18.75	
10	19.6	1.29	18.80	
41	19.15	1.28	18.75	
37	18.05	1.26	18.95	
15	17.65	1.25	19.05	

Figura 25 - 22 cefeidas na galáxia do triângulo M33 (extraído de [38]).

TABLE II.  
CEPHEIDS IN M 31.

Var. No.	Period in Days	Log. P	Photographic
			Magnitude Max.
5	50.17	1.70	18.4
7	45.04	1.65	18.15
16	41.14	1.61	18.6
9	38	1.58	18.3
1	31.41	1.50	18.2
12	22.03	1.34	19.0
13	22	1.34	19.0
10	21.5	1.33	18.75
2	20.10	1.30	18.5
17	18.77	1.28	18.55
18	18.54	1.27	18.9
14	18	1.26	19.1

Figura 26 - 12 Cefeidas em Andrômeda M31 (extraído de [38]).

A distância média das nebulosas M31 e M33 encontradas por Hubble foi 285.000 pc ou 930.000 anos-luz.

A conclusão básica do trabalho de Hubble é que a questão central discutida no Grande Debate, a saber: Eram as nebulosas Universos ilha (nebulosas espirais)? Foi encerrada com a descoberta das Cefeidas em Andrômeda e a subsequente determinação de sua distância por Hubble. Esse trabalho marcou o início de uma nova disciplina que ficaria conhecida como Astronomia Extragaláctica.

## CAPÍTULO 4

# A DESCOBERTA DA EXPANSÃO DO UNIVERSO

### 4.1 Introdução

Em 1915, Einstein propôs sua teoria de gravidade que ficaria conhecida como teoria geral da relatividade (ou simplesmente relatividade geral). Dois anos depois (1917), ele aplicou sua teoria para o Universo como um todo, iniciando a cosmologia relativística teórica. O modelo proposto por Einstein era homogêneo, isotrópico e estático<sup>16</sup>. Para que fosse estático, Einstein modificou suas equações de 1915, introduzindo uma força repulsiva (representada pela constante cosmológica  $\Lambda$ ). O novo termo era capaz de impedir o colapso do Universo sob ação de sua auto-gravitação, tornando matematicamente possível a solução estática.

Posteriormente, Friedmann (1922, 1924) e Lemaître (1927) obtiveram soluções cosmológicas não estacionárias da relatividade geral. Os modelos eram também homogêneos e isotrópicos (como o de Einstein), mas admitiam expansão do espaço. Em seu artigo de 1927, Lemaître também demonstrou que para baixos *redshifts*, as velocidades de afastamento das nebulosas nos modelos expansionistas seriam proporcionais à distância<sup>17</sup>.

Décadas depois, os novos modelos expansionistas ficariam conhecidos pelo grande público como teorias do “Big-Bang”, pois no início dos tempos a densidade dos modelos tendem para o infinito.

A primeira confirmação dos novos modelos foi obtida por Hubble, um resultado que ficaria conhecido por Lei de Hubble. Não será mais possível admitir um Universo estático como admitia Einstein. Deste modo, de acordo com Friedmann (1922 – 1924), Lemaître (1927) e Hubble (1929), o modelo do Universo era homogêneo, isotrópico e em expansão.

Neste capítulo, descreveremos o caminho de Hubble, ou seja, como ele partiu de sua solução da ambiguidade do Grande Debate para a descoberta da expansão Universal.

---

<sup>16</sup> Einstein trabalhava sem conhecimento dos resultados de Vesto Slipher que desde 1912 media velocidades radiais das nebulosas.

<sup>17</sup> Em 1923 uma tabela contendo 41 dados de velocidades radiais de nebulosas obtidas por Slipher foi publicada por Eddington em seu livro de Relatividade Geral [17].

## 4.2 A caminho do Universo em expansão

Visão de um Universo infinito e estático que havia sido proposto por Newton sobreviveu até início do século XX, entretanto nas duas primeiras décadas do século XX observaremos o abandono do modelo do Universo estático que era amplamente aceito.

Em 1911, no Observatório de Lick, o astrônomo Campbell determinou velocidades radiais de estrelas encontrando valores de + 3 km/s[25].

Interessado em determinar as velocidades radiais de nebulosas, Vesto Slipher adaptou ao refrator de vinte e quatro polegadas do Observatório Lowell uma câmera com distância focal pequena a fim de obter espectros com boa definição. O objetivo era obter espectros de nebulosas com mais detalhes, do que os obtidos no trabalho de Sir William Huggins (1824-1910) realizado em 1864.

Quando a placa fotográfica dos espectros de nebulosas foram reveladas se observa o deslocamento das linhas de absorção, com expressão de efeito Doppler (ver apêndice E) determinando-se a velocidade radial utilizando a equação:

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \cong \frac{V_r}{c}, \quad (4.1)$$

onde  $\lambda_{em}$  é o comprimento de onda emitido pela fonte, (seria o comprimento de onda medido por um observador em repouso em relação a fonte),  $\lambda_{obs}$  é o comprimento de onda medido no observatório terrestre com o espectrômetro acoplado a um telescópio,  $V_r$  é a velocidade radial.

Deste modo Slipher, em 1912, obteve no caso da nebulosa Andrômeda um deslocamento das linhas de absorção para o azul (blueshift), mostrando que ela se aproximava da Via Láctea com velocidade de 300 km/s. Os espectros de outras nebulosas revelavam um deslocamento das linhas de absorção para o vermelho (redshift) demonstrando que possuem velocidade de afastamento. Em 1914 Slipher conhecia as velocidades radiais de treze nebulosas e em 1925 chegou a quarenta e uma nebulosas, cujos valores variavam de - 305,7 Km/s até + 1.810,5 km/s sendo que o valor médio era + 603,5 km/s[18]. Velocidades negativas indicam que as nebulosas se aproximavam da Terra e velocidades positivas indicavam afastamento (deslocamento para o azul - blueshift, deslocamento para o vermelho-redshift).

Os valores de velocidades radiais altos indicavam que nebulosas não estavam sujeitas à ação gravitacional do nosso sistema estelar, portanto nebulosas eram sistemas independentes sugerindo que a hipótese do Universo ilha poderia ser verdadeira [18].

E importante mencionar que tais resultados permaneceram desconhecidos por grande parte dos relativistas (incluindo Einstein) até que foram publicados no livro de Eddington de 1923 [16].

Em 1919 [25] Knut Emil Lundmark (1889 - 1958) astrônomo sueco estima a distância a nebulosa Andrômeda em 220.000 pc. No mesmo ano Harlow Shapley sugere uma possível relação da velocidade com a distância para as nebulosas.

Friedmann, entre 1922 e 1924, supôs que o Universo poderia expandir e obteve soluções expansionistas para as equações cosmológicas da relatividade geral. As soluções que permitem a expansão do espaço, como posteriormente um modelo de Universo em expansão.

Posteriormente Georges H.P. Lemaître entre 1925 e 1927, também obteve um modelo de Universo em expansão, propondo que as velocidades de afastamento (redshift) seriam proporcionais à distância [26], estima ainda que a taxa de expansão do Universo seria de  $575 \text{ km} / \text{s} / \text{Mpc}$  [25]. Lemaître publica seu trabalho na revista da Sociedade Científica de Bruxellas em 1927, uma revista pouco conhecida. Assim o trabalho será publicado novamente somente 1931 na Monthly Notices of the Royal Astronomical Society [26].

Lemaître tabelou as distâncias, com velocidades entre 0 e 2000  $\text{km} / \text{s}$  o que possibilitou anos mais tarde, estimar a taxa de expansão de  $H = 575 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  [25], sem, no entanto, produzir um gráfico como o elaborado por Hubble.

As observações de Vesto Slipher estão de acordo com a teoria de Friedmann e Lemaître e mostravam a possibilidade de um Universo em expansão, embora o modelo de Universo estacionário ser amplamente aceito.

### **4.3 O Trabalho de Hubble e Humason**

Seguindo os passos de Slipher, Hubble juntamente com Humason no Observatório do Monte Wilson também utilizaram o telescópio acoplado a um espectrógrafo para obter espectros de nebulosas espirais. Na verdade, o trabalho de obter estes espectros era de

Humason que passava a noite verificando se o telescópio seguia corretamente a espiral. No final da noite, retirava a placa de vidro com o espectro e a enviava para revelação.

Uma vez revelada a placa que mostrando o deslocamento das linhas de absorção, Hubble, com a equação 4.1 do efeito Doppler (ver apêndice E), determinava a velocidade<sup>18</sup> radial. Um valor positivo de  $z$  (redshift) indica que a nebulosa se afasta, a nebulosa NGC 1023 possui velocidade radial 300 km/s e  $z = + 0,001$  (se afasta com um milésimo da velocidade da luz). Contudo um valor negativo de  $z = - 0,001$  (blueshift), indica que a nebulosa de Andrômeda se aproximava da Terra. Ela se aproxima com um milésimo da velocidade da luz, cerca de quatro bilhões de anos a nossa galáxia se fundirá com a galáxia de Andrômeda

Mas um outro problema teve que ser solucionado; as velocidades radiais das nebulosas deveriam ser determinadas considerando o movimento do Sol, isto é, como o movimento do Sol influi no valor da velocidade radial, Hubble utiliza expressões para eliminar o movimento solar das velocidades radiais, expressões que foram publicadas no artigo “A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae” [17].

As distâncias das nebulosas espirais foram determinadas utilizando o método das Cefeidas e luminosidades. Hubble construiu uma primeira tabela com quarenta e seis nebulosas. No entanto utilizou o apenas de vinte e duas pois considera que suas distâncias possuem valores mais confiáveis pois foram determinadas sem utilizar valores médios de luminosidades, produzindo assim uma segunda tabela (**Figura 27**). Hubble elabora então um gráfico (**Figura 28**) das velocidades aparentes de vinte duas nebulosas em função das distâncias onde a unidade era  $10^6$  parsecs. O trabalho que foi publicado [17] em 1929.

---

<sup>18</sup> Hubble chamava velocidade aparente o que chamamos de velocidade radial

TABLE 2  
NEBULAE WHOSE DISTANCES ARE ESTIMATED FROM RADIAL VELOCITIES

	OBJECT	$v$	$v_s$	$r$	$m_t$	$M_t$
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
Mean					10.5	-15.3

Figura 27 - Distâncias estimadas a partir das Velocidades Radiais.  $r$  distância em  $10^6$  parsecs,  $v$  em km/s,  $m_s$  magnitude aparente das estrelas mais brilhantes,  $m_t$  magnitude aparente efetuadas por Holetschek e  $M_T$  magnitude absoluta determinada por  $m_t$  e  $r$  (extraído de [17]).

No gráfico da **Figura 28**, os pontos pretos e a linha cheia se referem as nebulosas cujas distâncias foram determinadas individualmente e é considerada a melhor reta média (melhor ajuste). Já os pontos brancos e a linha tracejada consideram valor médio para um grupo de nebulosas.

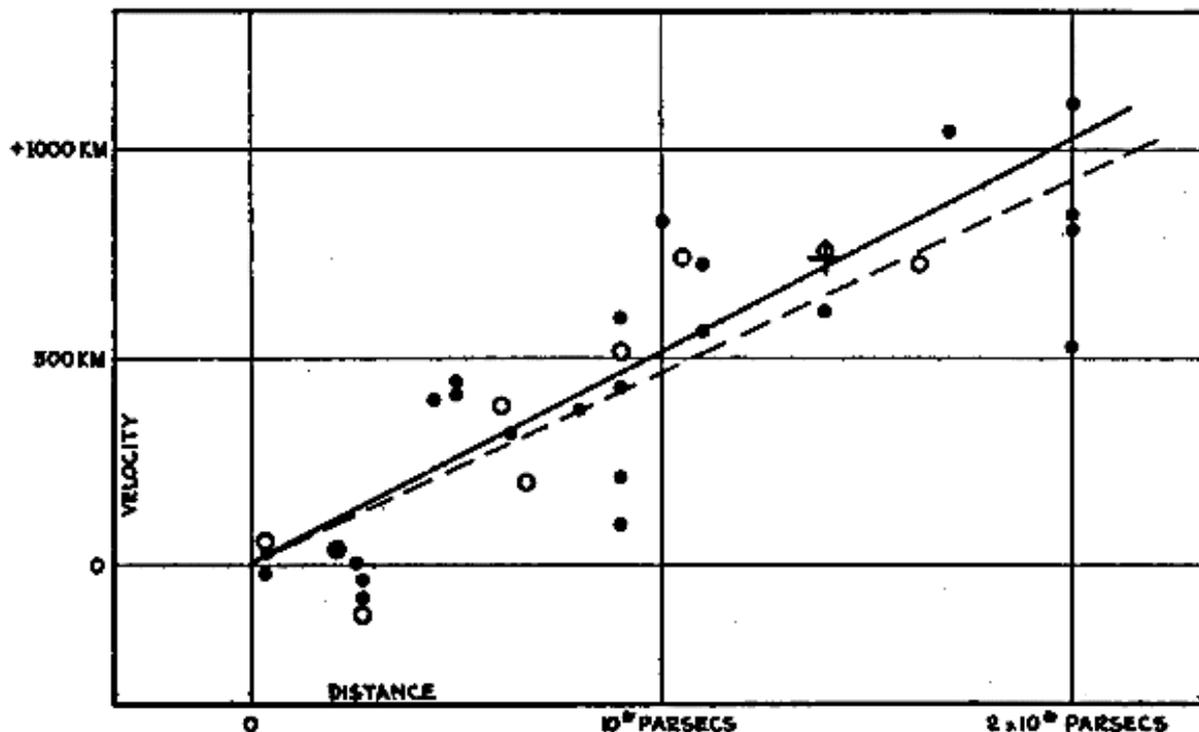


Figura 28 – Diagrama original de Hubble. No gráfico temos a velocidade radial em função da distância. A linha sólida é o melhor ajuste para as Velocidades em função das Distâncias para as nebulosas (discos pretos) (extraído de [18]).

A taxa de expansão obtida pelo coeficiente angular da reta média de gráfico,  $H$  é chamado constante de Hubble  $H$ .

$$\text{taxa de expansão} = \frac{\Delta V}{\Delta D} \quad \text{ou} \quad H = \frac{\Delta V}{\Delta D}$$

$$V_r = H_0 \cdot D \quad (4.2)$$

Na literatura o índice “o” indica o valor da constante hoje e a equação 4.2 recebeu o nome de Lei de Hubble.

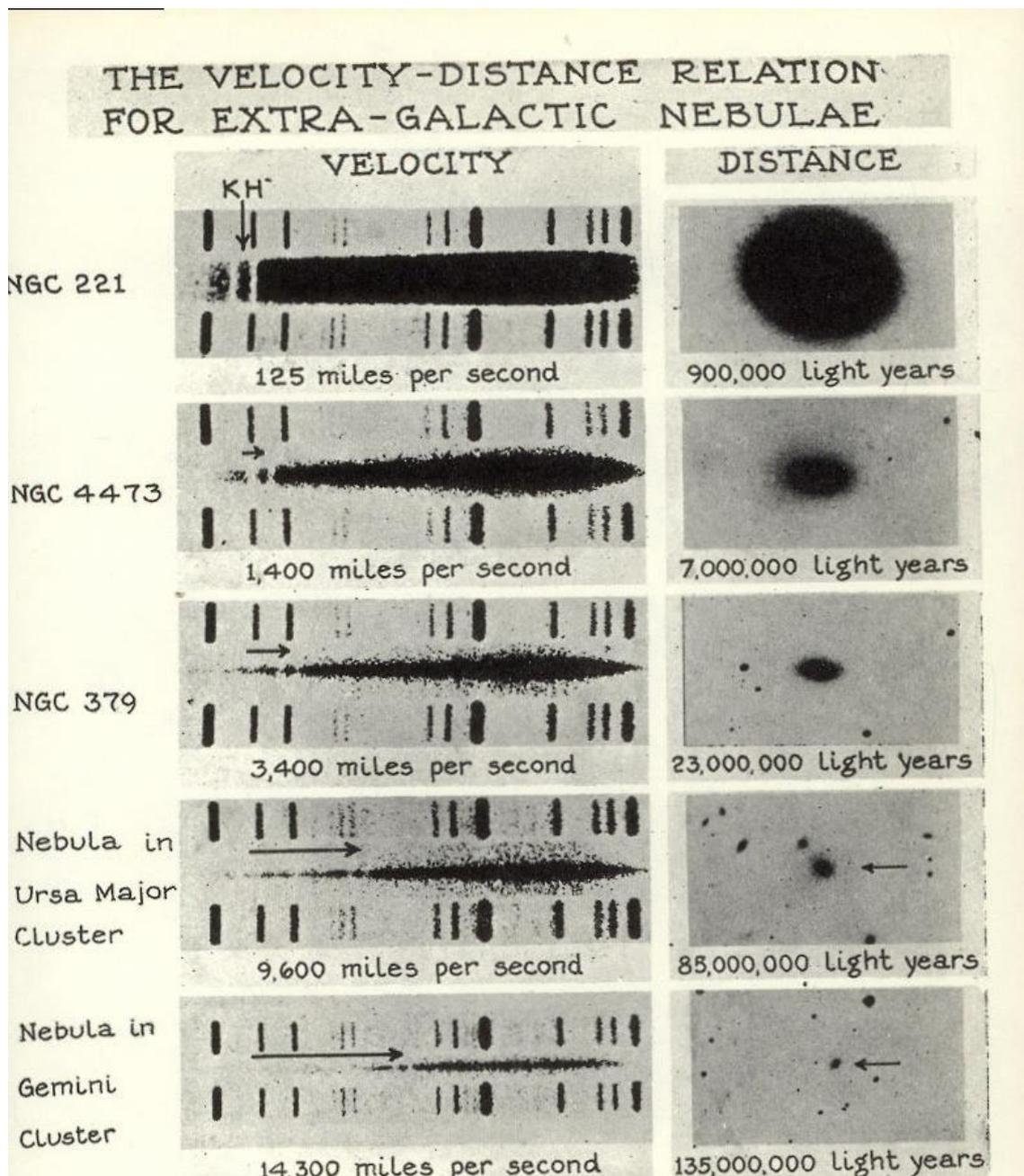
Hubble e Humason encontraram vários valores para  $H_0$ ;  $465 \text{ km. s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ,  $513 \text{ km. s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ,  $535 \text{ km. s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  e  $526 \text{ km. s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  e o valor proposto por Lemaître era  $600 \text{ km. s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  [26]. Deste modo os valores encontrados por Hubble e Humason estariam de acordo com o Universo em expansão de Lemaître [26]. O Universo, segundo Lemaître, teria surgido devido à explosão de um átomo primordial. Assim, as galáxias estariam se afastando com velocidade proporcional à distância.

Entre 1928 e 1935 Humason determinou cerca de 150 novas velocidades radiais, atingindo distâncias cada vez maiores [18]. Na **Figura 29**, os espectros à esquerda apresentam as linhas de absorção K e H do cálcio, para NGC 221 as linhas se deslocam para o azul (esquerda) e nas demais o deslocamento é para o vermelho (direita). As velocidades estão apresentadas em milhas, seguindo o padrão norte americano.

Sendo 1 milha = 1,6 km teremos:

- 200 km/s para NGC 221,
- 2.240 km/s para NGC 4473,
- 5.440 km/s para NGC 379,
- 15.360 km/s para Ursa Major,
- 22.880 km/s para Gemini

Como notamos na **Figura 29**, o aglomerado de Gemini se encontra a uma distância de 135.000.000 anos-luz ou 41.391.190 pc, um valor superior ao limite do método das Cefeidas (+/- 13.046.000 anos-luz) para determinar distâncias. Se torna evidente que a lei de Hubble pode ser utilizada inversamente, ou seja, como um novo método para determinar distâncias de galáxias mais afastadas.



**Figura 29– Relação Velocidade – Distância para Nebulosas Extra Galáctica. (extraído de [18]).**

Um fato logo alertaria os defensores do Universo estático: se as galáxias hoje se afastam, no passado estariam mais próximas e, voltando ao início, estariam comprimidas em um só ponto. Deste modo seria possível avaliar o tempo do Universo.

Utilizando a definição de velocidade e a lei de Hubble:

$$V_r = \frac{D}{T} \quad e \quad V_r = H_o \cdot D$$

Então

$$\frac{D}{T} = H_o \cdot D$$

$$H_o = \frac{1}{T} \quad (4.3)$$

Admitindo  $H_o = 510 \text{ km. s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  com um valor médio de  $H_o$  encontrados por Hubble e Humason e que  $1 \text{ Mpc} = 3,086 \cdot 10^{19} \text{ km}$ . Podemos calcular a idade do Universo:

$$T = \frac{1}{\frac{510}{3,086 \cdot 10^{19}}} = 1.920.946.156,24 \text{ anos} = 1,9 \cdot 10^9 \text{ anos}$$

Este valor para idade do Universo é incompatível com a idade da Terra que era  $4,54 \times 10^9$  anos. Para os defensores do Universo estático os resultados de Hubble apoiariam a tese que o Universo não estaria se expandindo. Logo após a publicação do trabalho de Hubble em 1929 o astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1976) sugere que o desvio para o vermelho observado por Hubble poderia [40] ser explicado se os fótons de luz perdiam energia e momento para o meio material interestelar, deste modo quanto maior a distância maior a perde de energia e o desvio para o vermelho o que estaria de acordo com a Lei de Hubble e a expansão do Universo poderia ser descartada.

A hipótese de Zwicky ficou conhecida como a “hipótese da luz cansada” logo seria descartada uma vez que a variação da largura das linhas de absorção no espectro de galáxias mais distantes não corroborava a hipótese.

Todavia, a partir dos anos 1940, novos valores para  $H_o$  [39] estarão disponíveis (ver **Figura 30**). Note que com a diminuição dos valores de  $H_o$ . A idade dos modelos expansionistas é inversamente proporcional ao valor de  $H_o$ , menor valor de  $H_o$  maior a idade do Universo. Deste modo o valor da idade tendem a ficar de acordo com a idade estimada para a Terra e também para a idade dos aglomerados globulares ( as estruturas mais velhas da galáxia).

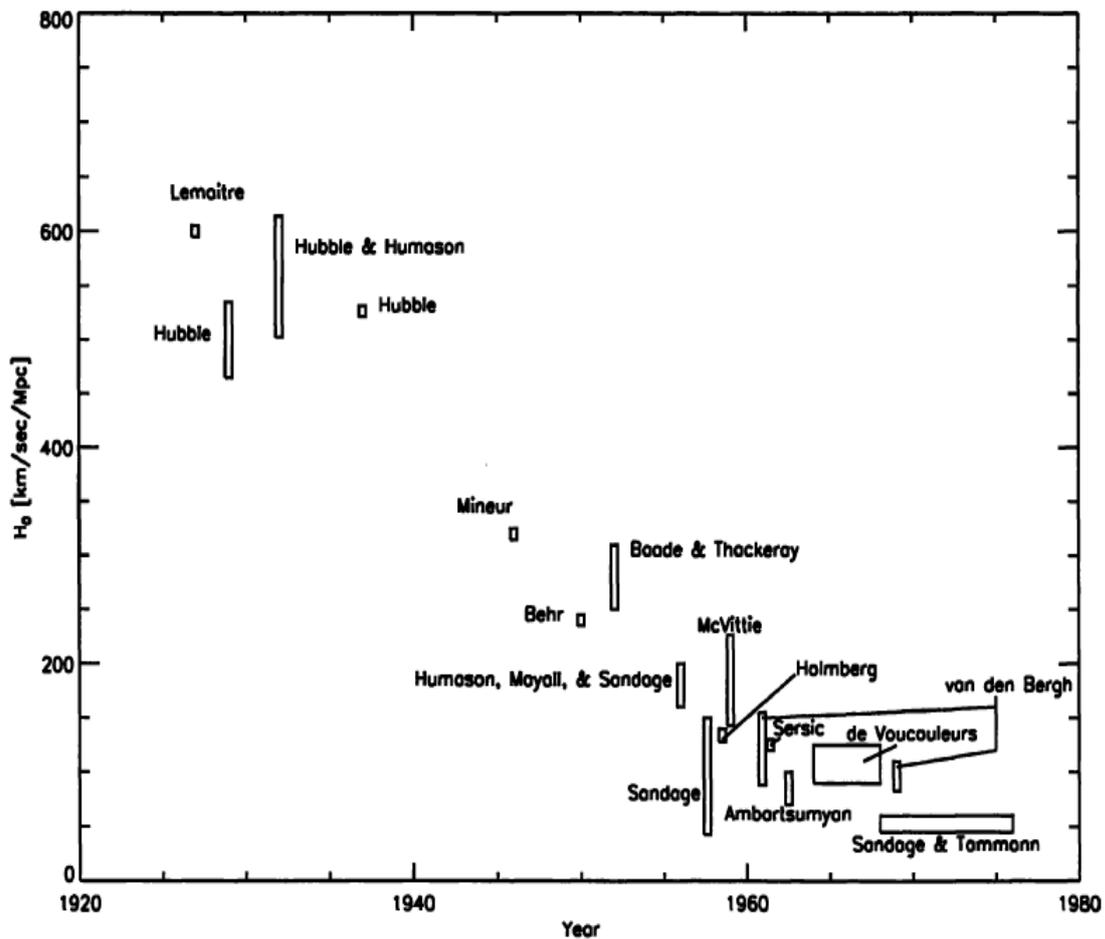


Figura 30 - Variação da constante de Hubble ( $H_0$ ) entre 1920 e 1980 (extraído de [39]).

Valores de  $H_0$  em  $\text{km. s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  apresentados no gráfico da Figura 30:

- Lemaître 600,
- Hubble 465, 513, 535;
- Hubble e Humason 526; Mineur 320;
- Behr 240;
- Baade<sup>19</sup> e Thackeray 280;
- Hubble, Mayall, e Sandage 180;
- Sandage 75;
- Holmberg 134;
- McVittie 143-227;

<sup>19</sup> Wilhelm Heinrich Walter Baade (1893-1960). O astrônomo e astrofísico alemão em 1952 calibrava novamente a relação perdida luminosidade das cefeidas determinando novas distâncias para as nebulosas e aglomerados globulares, corrigindo deste modo os valores superestimados das distâncias dos aglomerados encontrados de Shapley em 1917.

- Sersic 125;
- Van den Bergh 100, 120;
- Ambartsumyan 70-100;
- Vaucouleurs 125, 100, 100;
- Van den Bergh 95
- Sandage e Tammann 45-60.

Consequentemente com os novos valores de  $H_0$  o modelo do Universo em expansão volta ao centro do palco.

O valor atualmente aceito para  $H_0$  está entre  $55 \text{ km. s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  e  $75 \text{ km. s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Estes valores produzem uma idade do Universo muito mais coerente em torno de 14.000.000.000 anos ou 14 bilhões de anos.

#### **4.4 Sobre a Relevância do Trabalho de Hubble.**

Logo que os resultados de Hubble foram publicados [17] em 1929, estes agitaram o mundo científico afinal, o Universo era considerado estático desde a antiguidade.

Em 1931 Einstein que já admitia um Universo em expansão visita Hubble e Lemaître comparece ao encontro; onde a teoria será confrontada com a observação. Um encontro que colabora para consolidar a cosmologia moderna.

Em 1917 Einstein, a princípio, adotou um modelo não expansionista [8] quando assumiu em suas equações uma constante  $\Lambda$ . A fim de impedir o colapso do Universo, a constante seria o inverso do quadrado do raio do Universo esférico; além disto, o Universo de Einstein era considerado como fluido perfeito sem pressão, finito, estático, homogêneo e isotrópico.

Willem de Sitter [8] em 1917, obteve uma nova solução para as equações de Einstein, uma solução cosmológica estática com  $\Lambda \neq 0$ . O Universo seria plano estático e permitiria movimento sem matéria. Como Hubble, não considerava verdadeira a ideia que o espaço se expande; isto é; um Universo expansionista. Hubble adota o Universo não expansionista de Sitter [41] uma vez que ele podia explicar o Efeito Doppler observado por ele.

O Universo expansionista foi defendido por Friedmann que, durante os anos de 1922 e 1924, utilizando as equações de Einstein considerando  $\Lambda$  como parâmetro livre e adotando  $\Lambda = 0$  [8] mostrou soluções que permitem a expansão do espaço:

- i. Uma curvatura positiva  $k = +1$  um Universo fechado e finito
- ii. Uma curvatura positiva  $k = 0$  um Universo plano e infinito
- iii. Uma curvatura positiva  $k = -1$  um Universo hiperbólico e infinito

Einstein, ao tomar conhecimento do trabalho de Friedmann, publica um artigo admitido que sua hipótese de uma constante cosmológica para evitar o colapso do Universo continha um erro matemático.

Outro defensor do Universo expansionista foi Lemaître que sugere uma constante cosmológica  $\Lambda$  como uma força repulsiva [8] que expande o espaço provocando o desvio para o vermelho das linhas espectrais observadas por Hubble. Em 1927, Lemaître utilizou as equações Einstein para elaborar seu modelo de Universo onde as galáxias possuem velocidade radial de afastamento proporcional à distância, sugeriu ainda um valor para a taxa de expansão do espaço.

O trabalho observacional de Hubble confirma o modelo de Universo expansionista, e um novo Diagrama de Hubble [42] permitiu estimar distâncias de galáxias mais afastadas utilizando com vela padrão estrelas supernovas do tipo 1A, o retângulo da **Figura 31** corresponde aos resultados obtidos por Hubble publicado em 1929 (ver **Figura 28**).

Importante salientar que para distâncias maiores se obtém velocidades radiais cada vez maiores até que encontrarmos velocidades radiais iguais ou maiores que a velocidade da luz, este fato violaria a Teoria da Relatividade Restrita (nenhum corpo pode possuir velocidade igual ou maior que a luz); todavia a Teoria Geral da Relatividade propõe que é o espaço entre as galáxias que sofre uma expansão enquanto a galáxia está fixa em espaço.

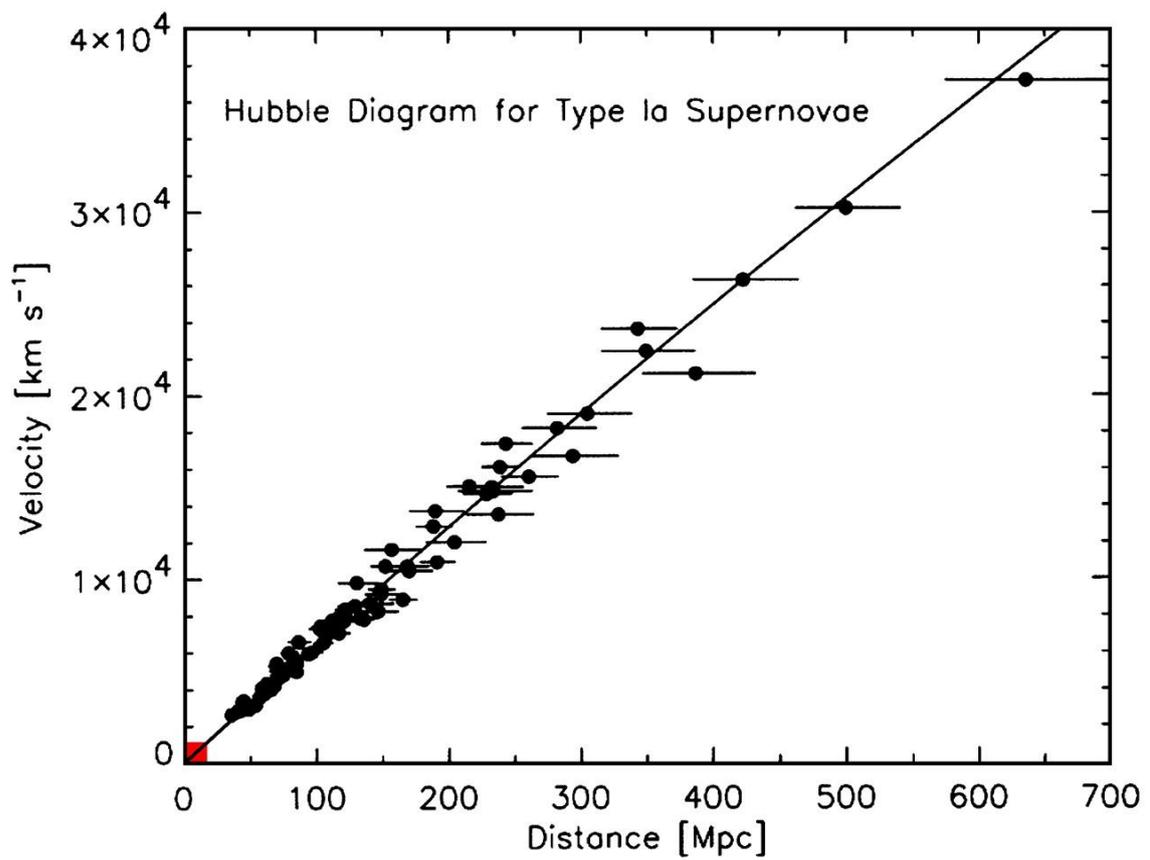
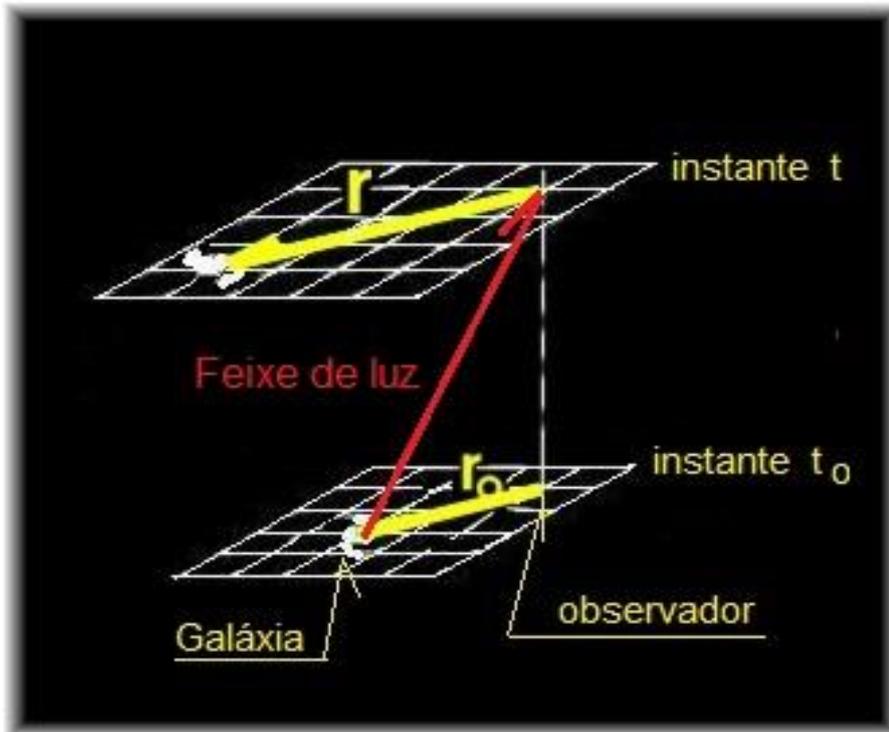


Figura 31 - Diagrama de Hubble, para eventos de Supernovas tipo Ia (extraído de [42]).

Ao se admitir a expansão do espaço se torna necessário um fator de escala que denote a expansão do espaço em função do tempo.



**Fig 32 - Fator de escala - Expansão do espaço**

Uma galáxia emite um feixe de luz no instante  $t_0$  e atinge o observador em um instante posterior  $t$ . Entretanto, devido a expansão do espaço, a galáxia se encontra a uma distância  $r$  maior que  $r_0$ . Podemos então definir o parâmetro de Hubble usando a seguinte definição do fator de escala:

$$r = a(t) \cdot r_0 \quad (4.4) \quad \text{ou} \quad a(t) = \frac{r}{r_0} \quad (4.5)$$

Derivando a equação 4.4 e aplicada à definição de velocidade teremos;

$$\vec{v} = \frac{\dot{a}}{a} \vec{r}$$

Assim a definição do parâmetro de Hubble:

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \quad (4.6)$$

Para a época atual, o parâmetro de Hubble será:

$$H_0 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)_{t=t_0}$$

Uma vez admitido a expansão do espaço se determina a equação Friedmann-Lemaître que descreve a evolução do fator de escala.

**Para demonstração da equação 4.7 ver apêndice D.**

$$\left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8}{3} \pi G \rho - \frac{Kc^2}{a^2} \quad (4.7)$$

O termo  $\frac{Kc^2}{a^2}$  decorre da Teoria Geral da Relatividade,  $a$  é o fator de escala,  $G$  é constante da gravitação,  $\rho$  densidade de energia e  $K = 0, \pm 1$  é o parâmetro da curvatura da secção espacial e  $c$  a velocidade da luz.

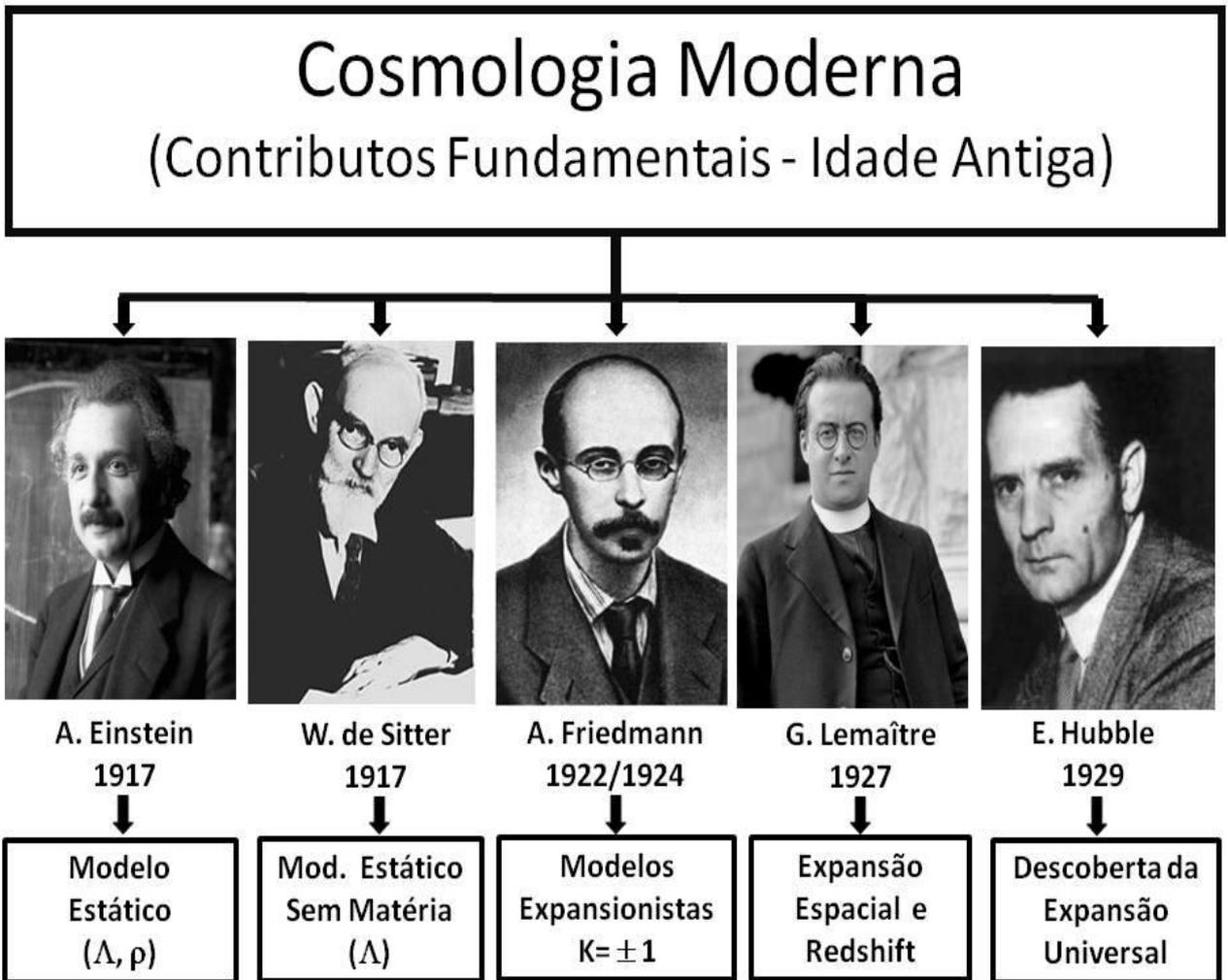
A confirmação da expansão do Universo apontou a necessidade de abandonar modelo de Universo estático proposto por Einstein, deste modo na segunda metade do século XX o modelo de Universo recebe o nome de modelo cosmológico padrão (teoria do “Big-Bang”) que se apoia nas soluções das equações de Friedmann e Lemaître. O Universo estava em expansão desacelerada, e em grande escala seria homogêneo e isotrópico. Obviamente, o novo modelo de Universo foi corroborado por dados observacionais [43]:

1. A velocidade de afastamento das galáxias como mostra a lei de Hubble.
2. A hipótese do nucleossíntese cosmológica é verdadeira, a nucleossíntese explica a criação de elementos mais leves. Logo após a grande explosão como o Hidrogênio, Deutério, Hélio e Lítio, a nucleossíntese também explicaria a abundância de elementos leves no Universo atual.
3. A Radiação Cósmica de Fundo (RCF) emitida quando os elétrons se combinam com núcleos atômicos de hidrogênio e hélio, a temperatura do Universo era então

3000 K. Atualmente esta radiação deveria ter temperatura de 3K e foi detectada em 1965 por Arno Penzias (1933) e Robert Woodrow Wilson (1936) que receberam o prêmio Nobel de 1978.

4. Confirmação da existência de matéria escura para explicar a rotação galáxias.

A relevância do trabalho de Hubble é clara. Ele comprovou a expansão do Universo legitimando o modelo de Universo expansionista e colaborou para consolidar a cosmologia com um novo ramo da física, sendo Einstein, Friedmann e Lemaître (**ver Figura 33**) seus expoentes e fundadores da Cosmologia Moderna.



**Figura 33 – Fundadores da Cosmologia Moderna.**  
 Da esquerda para a direita: Einstein - Modelo Estático, de Sitter - Modelo Estático sem matéria, Friedmann – Modelos Expansionistas, Lemaître – Expansão espacial e redshift e Hubble – descoberta da Expansão Universal (extraído de [8]).

## COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÃO

A cosmologia nasce na Grécia antiga. Primeiramente, Eudoxo propõe um modelo com a Terra no centro de esferas transparentes e concêntricas, cada esfera possuindo um corpo celeste iniciando-se com a Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter, Saturno e estrelas fixas nesta ordem.

O modelo oferecia uma explicação para o movimento dos planetas e estrelas. Modificado por Aristóteles, manteve os sistemas de esferas e a posição da Terra no centro, mas incorporou a uma explicação para o movimento “natural” dos corpos além considerar o céu “inocorrível”.

Ptolomeu, no segundo século da nossa era, altera o modelo de Aristóteles colocando planetas descrevendo epiciclos cujo centro girava em torno da Terra com velocidade constante. Assim explicava o movimento retrógrado dos planetas além de melhorar a precisão dos calendários. Embora na antiguidade Aristarco de Samos tenha avaliado as distâncias do Sol e da Lua, distâncias de outros corpos eram possíveis de determinar.

Da antiguidade clássica herdamos um modelo de Universo geocêntrico, finito e estático.

Somente no fim do século XIV o modelo de Ptolomeu começa a ser questionado. Copérnico retoma o sistema heliocêntrico de Aristarco. Tycho Brahe determina as posições de um cometa mostrando que o sistema de esferas de Aristóteles era inexato, Brahe também elaborou uma tabela das posições de Marte tabela que Kepler utilizou para estudar a órbita de Marte em torno do Sol. Galileu construiu um telescópio refrator com o qual demonstrou a existência de manchas solares, montanhas na Lua, satélites em Júpiter e as fases de Vênus.

Newton utilizou os trabalhos de Tycho, Kepler e Galileu ao publicar a teoria da gravitação universal que permite elaborar um modelo de Universo que é heliocêntrico, estático e infinito. Na metade do século XVIII ao se observar o céu sem telescópio, se notava uma série objetos celestes difusos que receberam o nome de nebulosas. O astrônomo William Herschel, o maior construtor de telescópios e considerado o mais importante astrônomo até o século XX, produziu um catálogo com mais de 1.000 nebulosas [11] em 1789. Em 1755, o filósofo Immanuel Kant (1724 -1804), propôs que

as nebulosas seriam sistemas estelares tal como a Via Láctea que estariam fora da Via Láctea; introduzindo assim a noção de “Universos Ilha “.

A medida que novas observações astronômicas se realizaram considerava-se que qualquer corpo celeste era parte integrante do nosso sistema estelar, e o Universo era a própria Via Láctea, pois a estrutura da Via láctea era desconhecida e não se considerava a possibilidade de corpos celestes fora da Via Láctea pois os métodos para calcular distâncias maiores não eram conhecidos. As distâncias dos corpos celestes mais afastados continuavam uma incógnita.

No final do século XIX e começo do século XX com a melhoria dos telescópios, possibilitou-se a determinação de distâncias até 100 pc ou 326 anos-luz, sendo este limite superado já na primeira metade do século XX.

Os astrônomos Ejnar Hertzsprung (1905) e Henry Norris Russell (1913) apresentaram o diagrama de espectro-luminosidade que permitiu desenvolver o método da paralaxe espectroscópica assim será possível aferir distâncias até 100.000 pc ou 320.000 anos-luz, possibilitando aferir com mais segurança, as distâncias dos aglomerados abertos e suas posições em relação ao disco da Via Láctea. As distâncias dos aglomerados globulares e das nebulosas espirais permaneciam desconhecidas.

Vesto Slipher procurou melhorar a técnica para produzir espectro de nebulosas a fim de obter suas velocidades radiais. Entre 1912 e 1925 determinou as velocidades radiais de quarenta nebulosas, encontrou valores de velocidades radiais para nebulosas sugerindo a possibilidade de questionar a condição estática do Universo.

Outro método para determinar distância foi desenvolvido a partir do trabalho de Henrietta Leavitt que apresentou a relação período - luminosidade de Cefeídas, relação que Ejnar Hertzsprung calibrou permitindo considerar Cefeídas como vela padrão para calcular distâncias de até 4.000.000 pc ou 13.046.255 anos-luz. Com o método das Cefeídas Shapley no Observatório Monte Wilson, entre 1914 e 1921, obteve as distâncias dos aglomerados e estudou a estrutura da Via Láctea. Entretanto as distâncias das nebulosas espirais continuavam desconhecidas.

Uma tentativa de esclarecer as dimensões da Via Láctea ocorreu em 1920, num debate entre Shapley e Curtis. Enquanto o primeiro discutiu o tamanho da Via Láctea e que nesta estão contidos todos os objetos tais como aglomerados e nebulosas espirais, o segundo apresentou argumentos onde as nebulosas espirais estão fora da Via Láctea e que esta apresenta um diâmetro dez vezes menor daquele proposto por Shapley. Shapley superestimou suas distâncias para aglomerados globulares e Curtis tentou determinar a

distância da nebulosa espiral de Andrômeda com valores entre 20.000 anos-luz e 500.000 anos-luz; um valor de distância pouco confiável, deste modo debate não apresentou resultados conclusivos e o Universo continua sendo a própria Via Láctea.

No entanto em 1923, Hubble descobre uma Cefeída na nebulosa de Andrômeda e determina sua distância de cerca de 659.504 anos-luz tornando-se evidente que nebulosas espirais são sistemas estelares que se encontram fora da Via Láctea. Hubble inaugura o estudo da cosmologia extragaláctica.

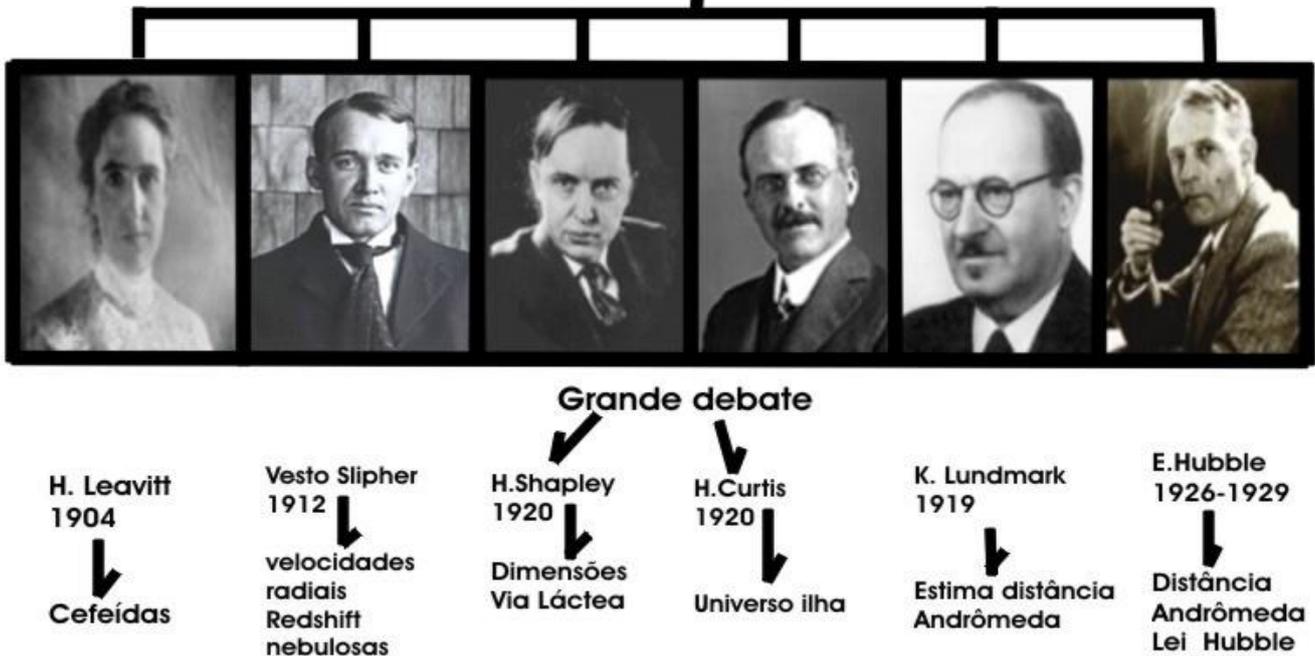
Hubble e Humason, no Observatório do Monte Wilson, continuam o trabalho de Vesto Slipher determinando as velocidades radiais de nebulosas. Humason teve a tarefa de obter espectros de nebulosas espirais. Hubble determina as velocidades radiais e plota estas velocidades em função das respectivas distâncias tornando evidente que o coeficiente angular da reta média de gráfico é a taxa de expansão do Universo. Em 1929 Hubble publica seus resultados. O Universo não era estático.

O trabalho observacional realizado por Hubble [44] entre 1920 e 1936 descobrindo as distâncias, as velocidades radiais das nebulosas e a lei que leva seu nome foi fundamental para comprovar a expansão do Universo e estabelecer as bases da cosmologia moderna confirmando modelo de Universo expansionista de Friedmann e Lemaître.

Indiscutivelmente o trabalho de Hubble se apoia no trabalho observacional de um brilhante grupo de astrônomos (ver **Figura 34**) que deste de 1904 vinham investigando de distâncias e as velocidades radiais das nebulosas.

# A Descoberta da Expansão

Contributos Fundamentais - Século XX



**Figura 34 – Principais contributos para a descoberta da expansão universal. Da esquerda para a direita: H. Leavitt – Relação período-luminosidade das Cefeidas. Vesto Slipher - medidas de velocidades radiais e redshift das nebulosas (galáxias). H. Shapley - tamanho da Via Láctea. H. Curtis distâncias até nebulosas espirais. Knut Lundmark - Estimativa da distância de Andrômeda. E. Hubble - Cálculo da distância de Andrômeda (Fundador da Astronomia Extragaláctica) e obtenção da relação distância – velocidade (Lei de Hubble) (adaptado de [8]).**

A melhoria das técnicas para obter distâncias mais confiáveis, a partir do final do século XIX, permitiu definir o tamanho da Via Láctea e as distâncias até as nebulosas espirais e por fim comprovar a expansão do Universo em 1929. Num intervalo de trinta anos o paradigma do universo estático que havia sobrevivido por mais ou menos 2.000 anos foi abandonado. A confirmação da expansão do Universo validou o trabalho de mais ou menos 12 anos dos cosmólogos modernos que defendiam o modelo de Universo expansionista.

Teremos agora um Universo homogêneo, isotrópico e em expansão desacelerada.

# APÊNDICES

## Apêndice A

### Distância: Paralaxe Trigonométrica

Paralaxe trigonométrica é um método muito importante, utilizado até hoje, considerado como uma medida direta produzindo resultados confiáveis.

Suponha que à medida que a Terra gira em torno do Sol você observa uma estrela e fotografa a sua posição, seis meses depois você volta a fotografar a mesma estrela. Notamos que existe um deslocamento na posição da estrela (**Figura A.1**), medido pelo ângulo  $2p$ .

Se você esticar o seu braço com o polegar levantado e olhar para o polegar com olho direito aberto e olho esquerdo fechado e depois fechar o direito e abrir o esquerdo notara o mesmo efeito.

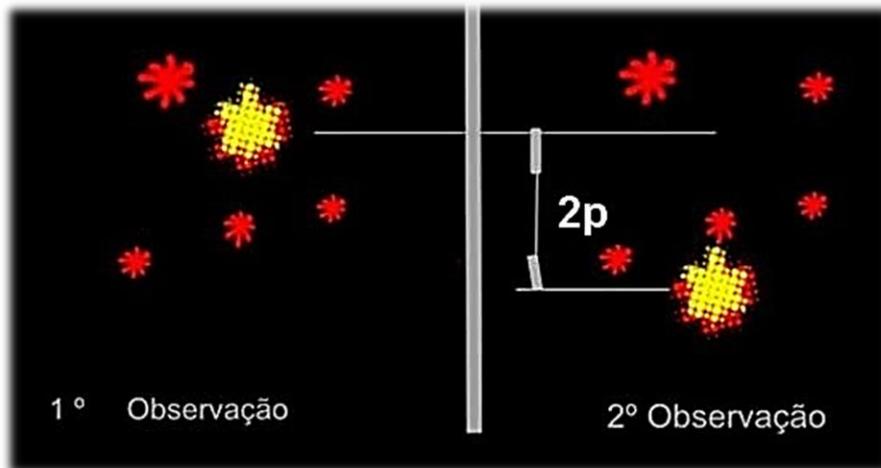
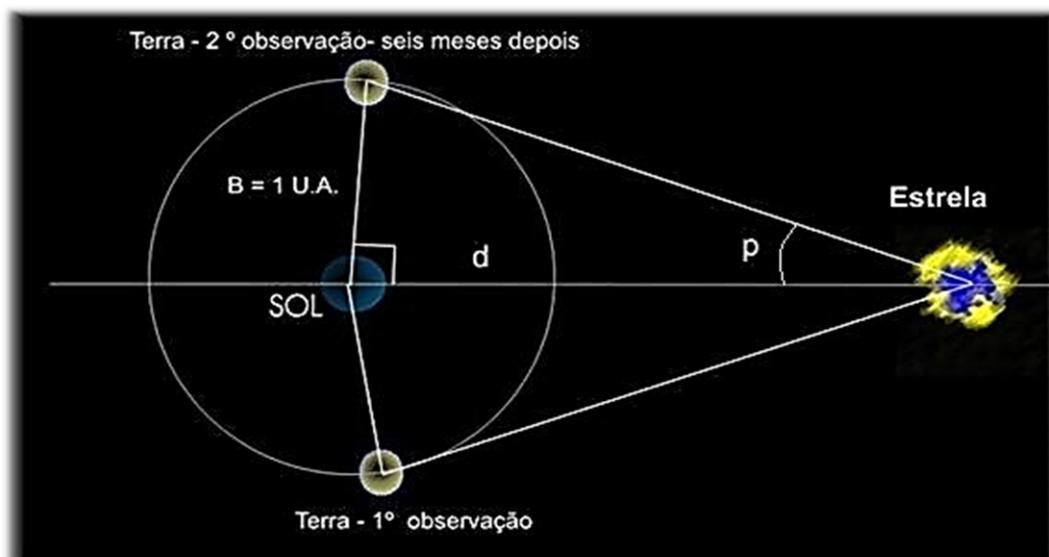


Figura A.1 - Deslocamento aparente da estrela, Paralaxe

Considere a órbita da Terra em torno do Sol (**Figura A.2**)



**Figura A.2 - Órbita da Terra e o ângulo de paralaxe; ângulo  $p$  em segundos de arco, linha de base  $B$  distância média da Terra Sol e  $d$  distância até estrela.**

A órbita da Terra em torno do Sol produz a paralaxe, lembrando que  $B = 1 \text{ U.A.}$  é a linha de base.

**Definição de Parsec:** Parsec é a distância de um objeto, que quando observado da Terra produz um ângulo de paralaxe  $p = 1''$ , um segundo de arco, como se utiliza a órbita (raio = 1 U.A) da Terra como sendo a linha de base, o ângulo  $p$  também é chamado de paralaxe heliocêntrica. Um segundo de arco ( $1''$ ) é  $4,85 \cdot 10^{-6}$  radianos. A palavra Parsec contração de “Paralax” e “second”.

No triângulo retângulo da **Figura A.2**

$$\tan p = \frac{B}{d}$$

Se  $p$  é um ângulo muito pequeno então a tangente de  $p$  é muito próxima da medida do ângulo  $p$  em radianos, assim:

$$\tan \mathbf{p} = \mathbf{p}(rad) = \frac{B}{d}$$

Conhecendo-se o ângulo  $\mathbf{p}$  em radianos calculamos a distância  $d$  em unidades astronômicas. Uma 1(U.A) é a distância média entre a Terra e o Sol  $1,5 \cdot 10^8$  Km. Mas  $B = 1$  U.A. então:

$$\tan \mathbf{p} = \mathbf{p}(rad) = \frac{1(U.A.)}{d(U.A.)} = \frac{1}{\mathbf{p}(rad)}$$

Os astrônomos utilizam ângulos medidos em segundos de arco ( $1 \text{ rad} = 206265''$ ) e distâncias  $D$  em parsecs (pc), mas  $1 \text{ pc} = 206.265 \text{ U.A.} = 3,26 \text{ anos-luz}$  assim:

$$D(\text{pc}) = \frac{1}{\mathbf{p}''} \quad (2.1)$$

$$D(\text{anos} - \text{luz}) = \frac{3,26}{\mathbf{p}''} \quad (2,2)$$

A equação 2.1 determina a distância em parsecs, a equação 2.2 determina a distância em anos-luz, sendo o ângulo  $\mathbf{p}$  em segundos de arco.

## Apêndice B

### Diagrama de espectro-luminosidade - Diagrama HR

Russell publica um artigo (1921) [27], onde apresenta seu diagrama espectro-luminosidade. No gráfico da **Figura B.1** as classes espectrais se encontram no eixo horizontal e a luminosidade ou magnitude absoluta no eixo vertical. Para obter as classes espectrais estudou o espectro de 100.000 estrelas, comparou estes espectros com a classificação de espectros de Fraunhofer. As estrelas estudadas foram enquadradas em seis tipos espectrais: B, A, F, G, K, M, suas cores variando, respectivamente, do branco-azul (tipo B, A) para o vermelho (tipo M). Russell propôs que esta diferença no tipo do espectro pode ser uma função da temperatura da estrela.

Para determinar a magnitude absoluta utiliza-se a definição de magnitude absoluta de Jacobus Kapteyn., Russell assume uma magnitude absoluta - 5 para uma a uma luminosidade de 7500 vezes maior que o Sol cuja magnitude absoluta é 4,7. Portanto magnitude absoluta de 14 corresponde a 1/5000 da luminosidade do Sol. Deste modo foi possível elaborar uma escala para o eixo vertical. No gráfico da Fig, B.1 Russell alerta que para os pontos de círculos abertos, se executou apenas uma medida, para os demais se efetuou pelos menos duas medidas.

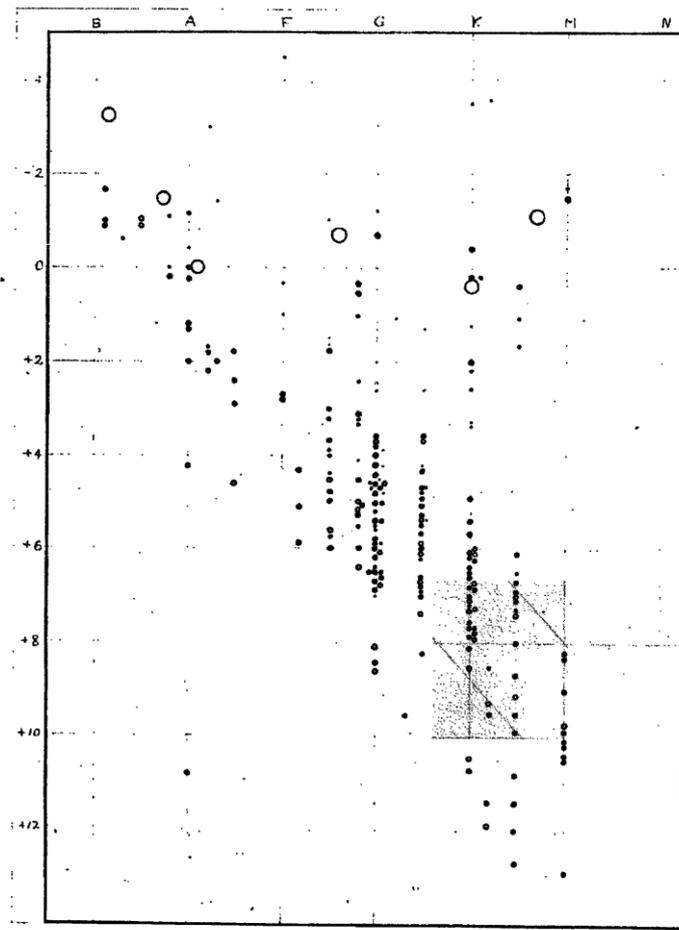


FIGURE 1.

**Figura B.1-Diagrama HR original de Russell. Classes espectrais no eixo horizontal e luminosidade ou magnitude absoluta no eixo vertical (extraído de [11]).**

Observando o gráfico da **Figura B1** notamos que:

A- Existem estrelas brancas e vermelhas com luminosidade alta, magnitudes absolutas de 0 até -5, mais ou menos 7.000 vezes maior que o Sol, na parte superior do gráfico.

B- Na parte inferior à direita do gráfico existem estrelas vermelhas com luminosidade baixa, magnitudes absolutas de + 4 até + 12, 1/5.000 vezes a luminosidade do Sol, lembrando que, para estas luminosidades, as paralaxes determinadas podem apresentar um erro significativo (+/- 40%) o que compromete o cálculo das magnitudes.

C- Nota-se que na parte superior e inferior do gráfico não existem registros de estrelas, o que sugere um limite nos instrumentos de observação.

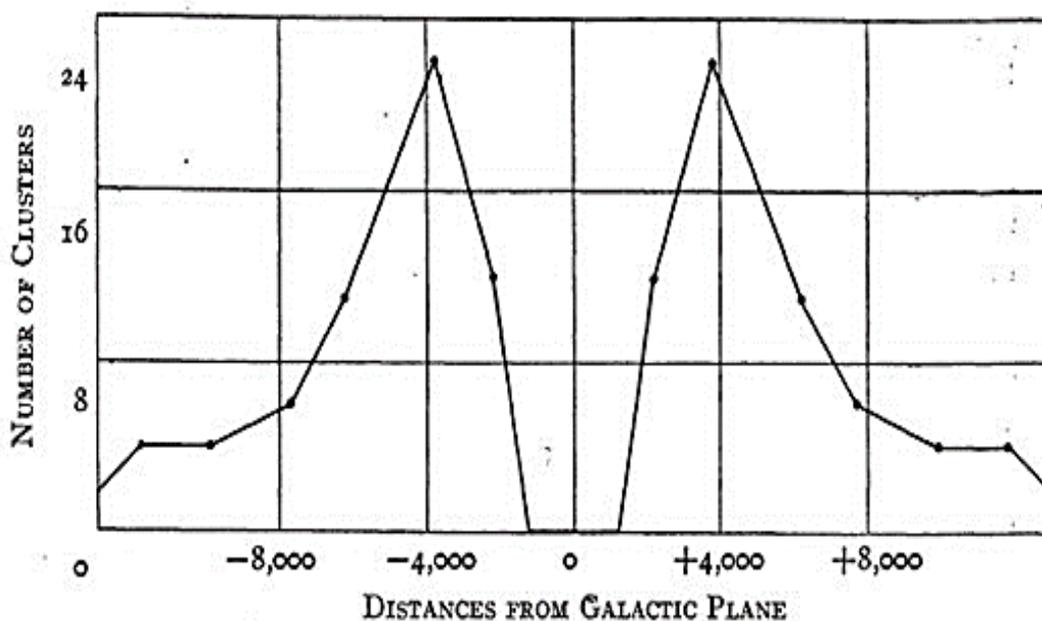
Russell também utiliza os trabalhos dos astrônomos Jacobus Kapteyn, Arthur Stanley Eddington e Benjamun Boss que estudaram de forma independente os grupos de aglomerados abertos; Hyades; Ursa Maior; 61 Cygni e Scorpius.

Ejnar Hertzsprung 1873-1967, astrônomo dinamarquês, também elaborou o seu gráfico espectro-luminosidade de maneira independente. Atualmente conhecemos este gráfico como Diagrama de Hertzsprung-Russell ou diagrama HR (**Figura 7**).

## Apêndice C

### Resumo do artigo “Globular Clusters and the Structure of the Galactic System” de Harlow Shapley [33]

Na **Figura C.1** Shapley apresenta as distâncias até o plano galáctico. Já é possível notar que no plano não existem aglomerados globulares.



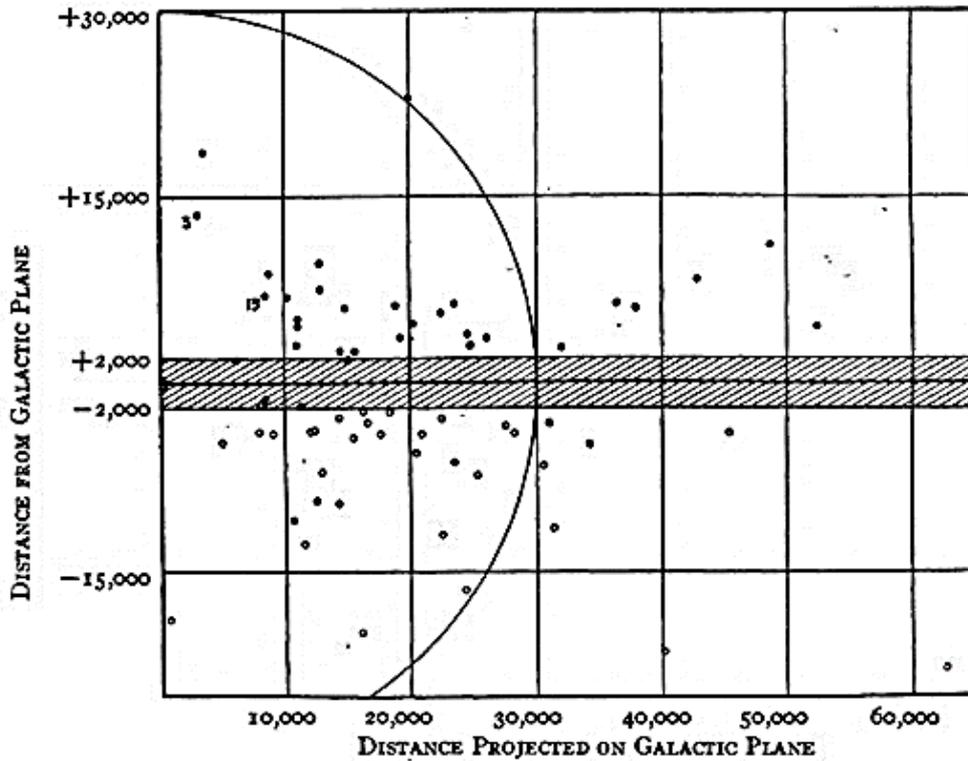
**Figura C1 - Distância dos aglomerados globulares até o plano galáctico (extraído de [33]).**

O estudo da distribuição no espaço de 69 aglomerados globulares (**Figura C.2**) mostra que:

1. Na parte norte do plano galáctico existem 32 grupos reconhecidos, na parte sul do mesmo existem 37. Sua distância média do plano é 6900 parsecs. O plano galáctico é fundamental, pois ele é um plano de simetria.

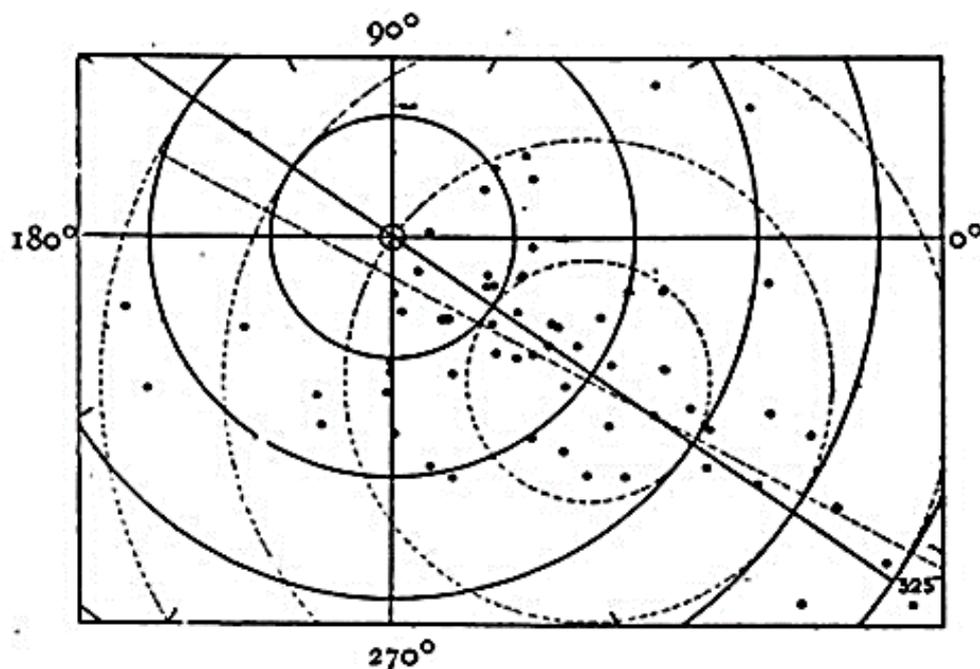
2. O plano galáctico não possui aglomerados globulares.

No gráfico da **Figura C.2** nos mostra as distancias utilizando o parsec como unidade, um parsec é 3,26 anos luz.



**Figura C 2 – Distância do plano galáctico em função da distância projetada no plano galáctico (extraído de [33]).**

A distribuição dos aglomerados globulares é apresentada no gráfico da **Figura C.2**, o raio do pequeno semicírculo correspondente a uma paralaxe de  $0.002''$ . Messier 3 e Messier 13, são indicadas por números.



**Figura C 3 - Aglomerados globulares projetados no plano da galáxia (extraído de [33]).**

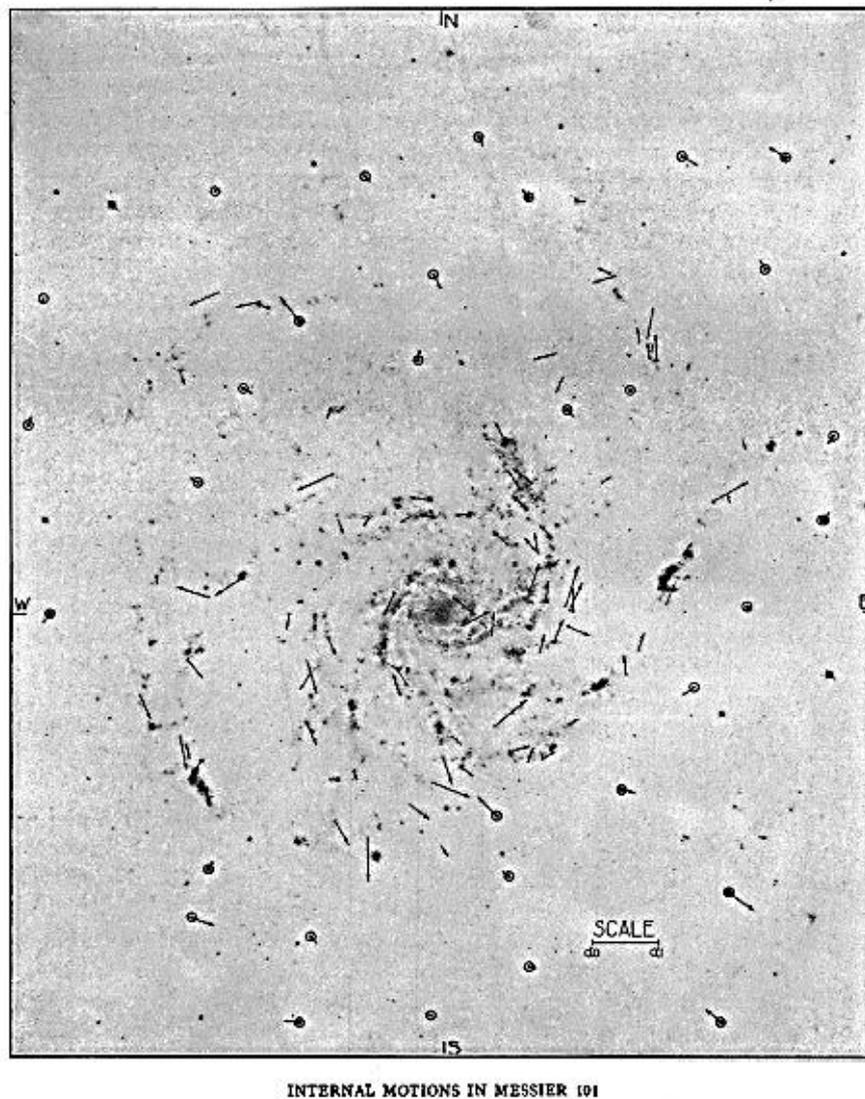
Na **Figura C.3**, no centro das linhas tracejada, encontra-se o centro dos aglomerados globulares, que também é o centro da Via Láctea. No centro das linhas cheias encontra-se o Sol, portanto o Sol não é o centro da Via Láctea.

Os aglomerados globulares estão na Via Láctea formando uma esfera cujo centro coincide com o centro do sistema, sendo que o aglomerado globular mais distante está a aproximadamente a 60.000 pc.

## Apêndice D

### Velocidade tangencial de M101(Galáxia do Cata-Vento)

Adriaan van Maanen do Observatório Mount Wilson, em 1916, utilizou a nebulosa espiral M 101 [45] para determinar qual era o seu período de rotação, isto é, calculou a velocidade tangencial de um ponto na borda de M101.



**Figura D.1: Movimentos internos Messier 101 (extraído de [45]).**

Como M101 encontra-se praticamente perpendicular à linha de visada, na **Figura D.1** as setas indicam a direção dos movimentos anuais médios. Adriaan van Maanen calculou qual seria a velocidade tangencial de um ponto na borda de M 101.

Supôs que a distância até M 101 seria 107 anos-luz, determinou o ângulo entre o centro de M 101 e sua borda é encontrou 8', desta maneira determinou o raio de M101.

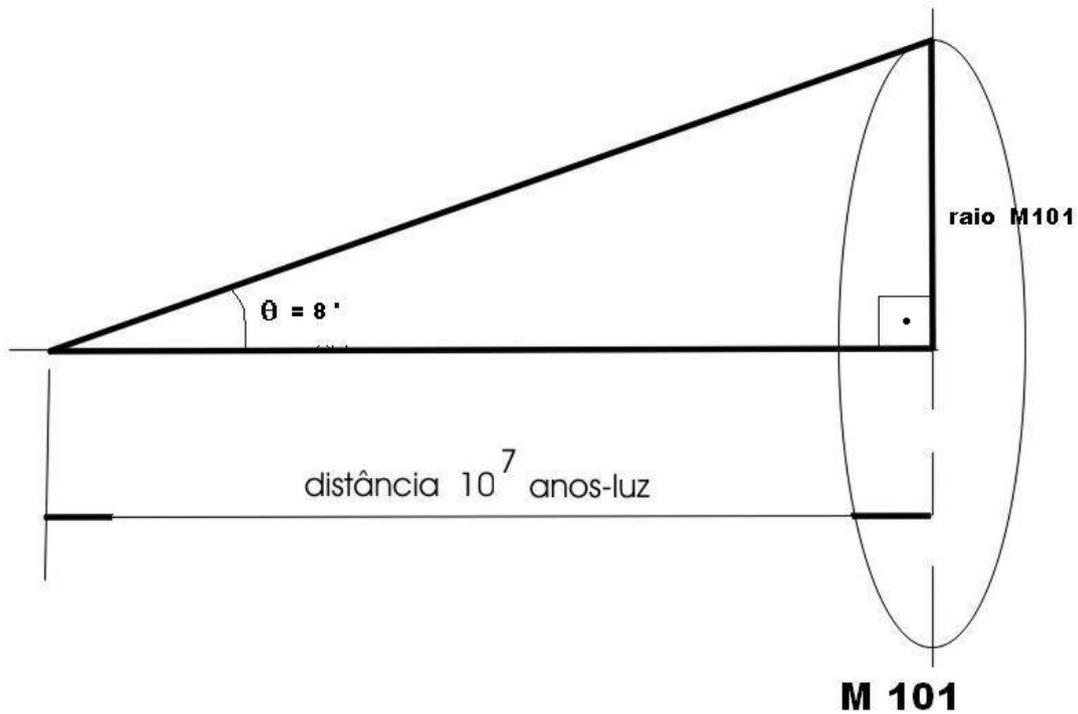


Figura D.2 - Movimento de rotação de Messier 101 (adaptado de [11])

*assim, definição de tangente*

$$\tan ' 8 = 0,00233 = \frac{r}{10^7}$$

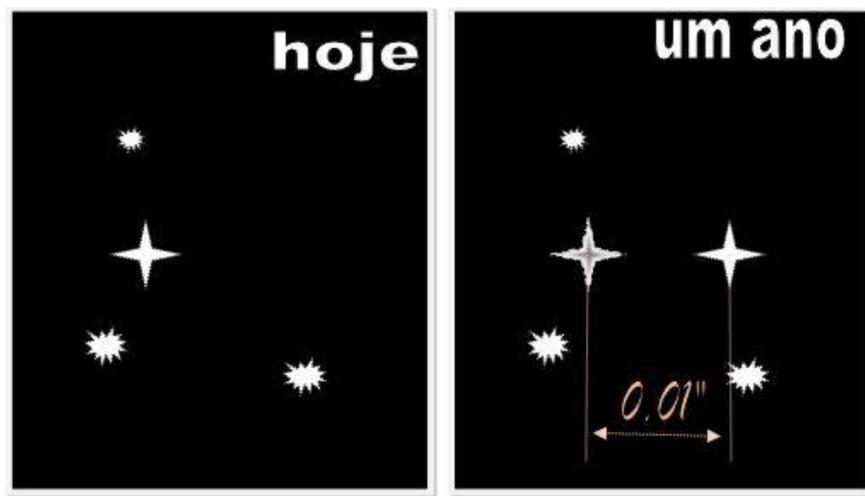
*portanto  $r = 23.300$  anos – luz.*

Como se conhecia o período de rotação de M 101,  $T = 85.000$  anos:

$$V = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2 \pi 23.300}{85.000} = 1,172 c$$

Este resultado mostra que a velocidade seria maior que a velocidade da luz; contrariando a teoria da relatividade restrita. Adriaan van Maanen alterou a distância para 1.000.000 anos-luz, mesmo assim a velocidade tangencial era 32.000 km/s, uma velocidade ainda muito alta.

Como a velocidade tangencial (movimento próprio) é alta, Maanen levantou a hipótese de que M 101 não era um Universo ilha, e deveria ser uma nebulosa espiral que estava dentro da Via Láctea. Lembrando ainda que estudos de Arthur Stanley Eddington sobre movimento próprio de estrelas, efetuado entre 1914 e 1916, observa que para um centésimo de segundo de arco (“0,01”) por ano teríamos uma distância 10.000 anos-luz (Figura D.3).



**Figura D.3 - Movimento próprio das estrelas**

Portanto nebulosas espirais como M 101 deveriam estar dentro da nossa Via Láctea, mas caso estivesse fora do nosso sistema, sua velocidade deveria ser muito baixa impedindo a realização da medida correta do ângulo devido à distância.

## Apêndice E

### Efeito Doppler

Admita que uma fonte sonora emite uma onda com comprimento de onda  $\lambda_{em}$  e frequência  $\nu_{em}$  e se desloca com velocidade  $V$  se aproximando de um observador A e se afastando de um observador B, considere que os dois observadores estão em repouso. O observador A nota um som agudo, portanto com frequência alta e comprimento de onda curto. O observador B nota um som grave, portanto com frequência baixa e comprimento de onda longo. Deste modo os observadores percebem comprimentos de ondas ( $\lambda_{obs}$ ) e frequências ( $\nu_{obs}$ ) com valores diferentes dos emitidos originalmente.

Para o observador A  $\nu_{obs} > \nu_{em}$  e  $\lambda_{obs} < \lambda_{em}$ .

Para o observador B  $\nu_{obs} < \nu_{em}$  e  $\lambda_{obs} > \lambda_{em}$

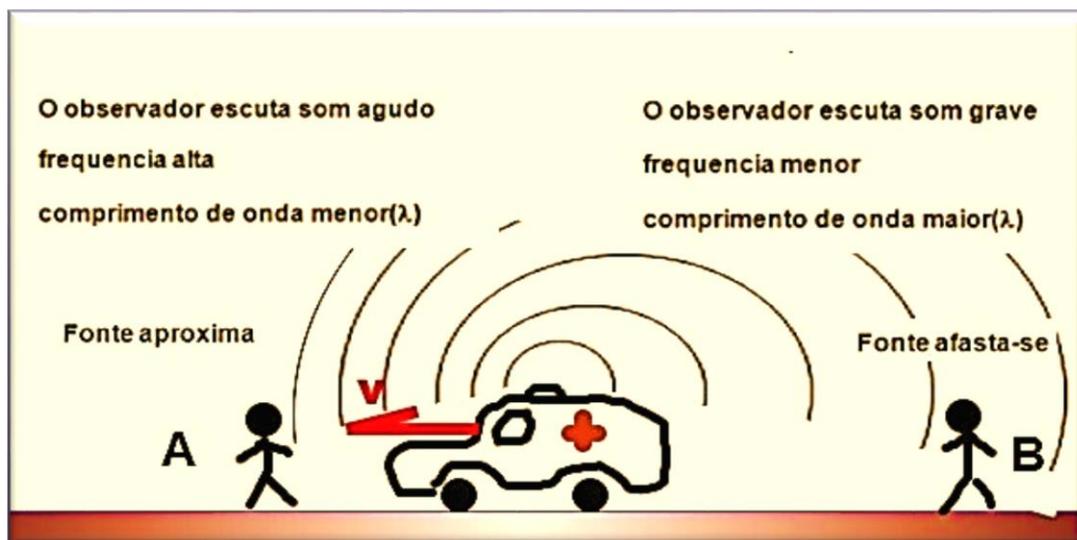
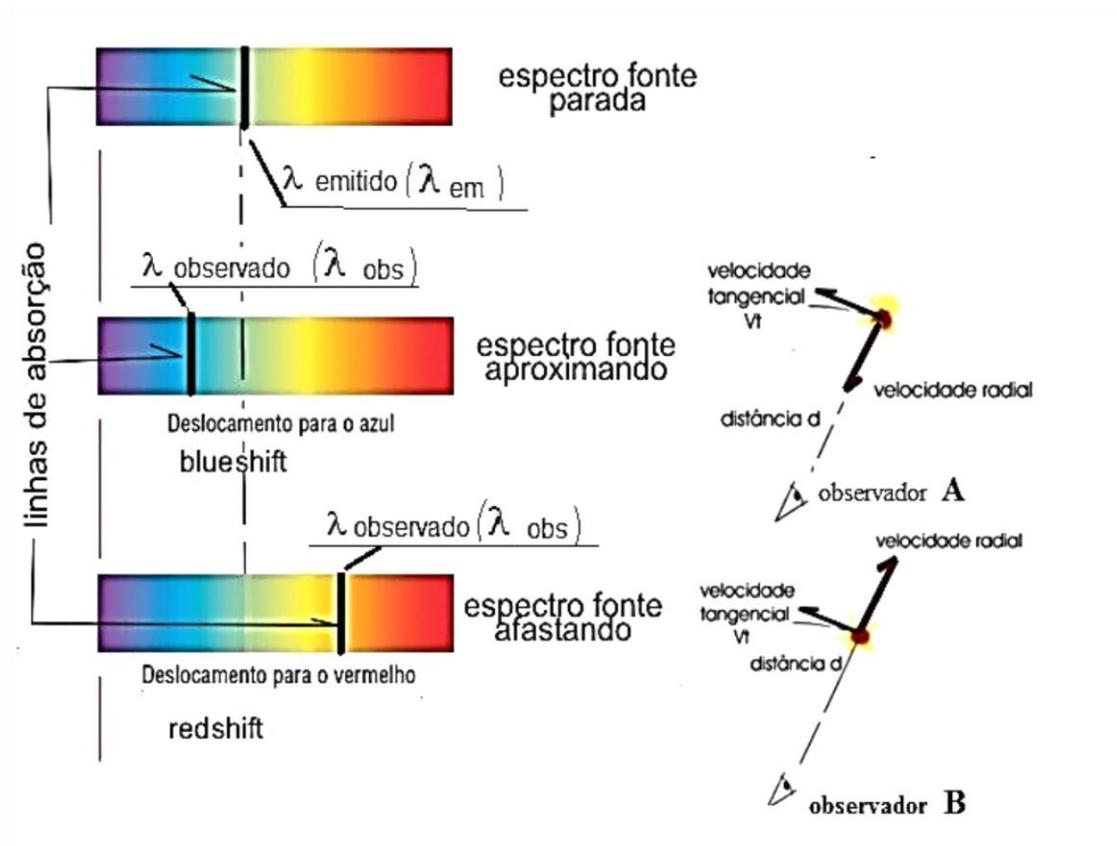


Figura E1 Efeito Doppler para uma fonte sonora

Com as mesmas condições considere agora uma fonte luminosa (uma estrela ou galáxia) que emite uma onda com comprimento de onda  $\lambda_{em}$  e frequência  $\nu_{em}$ . Do mesmo modo que o som os observadores percebem comprimentos de ondas ( $\lambda_{obs}$ ) e frequências ( $\nu_{obs}$ ) com valores diferentes dos emitidos originalmente. No caso da luz, para se notar a diferença entre os valores emitidos e observados, é necessário produzir um espectro da

fonte luminosa e observar o deslocamento das linhas de absorção do espectro. Para o observador A a fonte se aproxima e as linhas de absorção se deslocam para a cor azul do espectro (blueshift), já para o observador B a fonte se aproxima e as linhas de absorção se deslocam para a cor vermelha do espectro (redshift). Para o observador A  $\lambda_{obs} < \lambda_{em}$ , para o observador B  $\lambda_{obs} > \lambda_{em}$



**Figura E2 Efeito Doppler para uma fonte luminosa**

Onde  $\lambda_{em}$  é o comprimento de onda emitido pela fonte, (seria o comprimento de onda medido por um observador em repouso em relação a fonte),  $\lambda_{obs}$  é o comprimento de onda medido no observatório terrestre com o espectrômetro acoplado a um telescópio,  $V_r$  é a velocidade radial.

Considere o caso da fonte se afastando assim o espectro apresenta redshift. Admita dois pulsos sucessivos emitidos pela fonte, a distância entre o primeiro ( $\lambda_{obs}$ ) e o segundo ( $\lambda_{em}$ ) será velocidade da fonte  $V_r$  multiplicada pelo período  $T$ .

$$d_r = \lambda_{obs} - \lambda_{em} = V_r \cdot T$$

$$se \quad T = \frac{\lambda_{em}}{c}$$

$$\lambda_{obs} - \lambda_{em} = V_r \cdot \frac{\lambda_{em}}{c}$$

$$\frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} = \frac{V_r}{c}$$

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \cong \frac{V_r}{c} \quad (4.1)$$

## Apêndice F

### Demonstração da Equação de Friedmann [46]

Considere uma massa  $m$  na superfície de uma esfera de raio  $R$ .

Considere a força gravitacional sobre a massa  $m$ ; aplicando a segunda lei de Newton

$$F_o = -\frac{GMm}{R^2(t)} \quad \text{ou} \quad F_g = m \frac{d^2R}{dt^2}$$

$$m \frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{GMm}{R^2(t)}$$

$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{GM}{R^2(t)}$$

*multiplicando por  $\frac{dR}{dt}$*

$$\frac{d^2R}{dt^2} \cdot \frac{dR}{dt} = -\frac{GM}{R^2(t)} \cdot \frac{dR}{dt}$$

*integrando*

$$\int \frac{d^2R}{dt^2} \cdot \frac{dR}{dt} dt = \int -\frac{GM}{R^2(t)} \cdot \frac{dR}{dt} dt$$

*escrevendo como derivada total o lado esquerdo*

$$\int \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right] dt = -GM \int \frac{1}{R^2} dt$$

*integrando*

$$\frac{1}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{GM}{R(t)} + E$$

*isolando energia E*

$$E = \frac{1}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{GM}{R(t)} \quad (F1)$$

A equação (F1) representa a conservação de energia, considerando a massa constante podemos escrever:

$$M = \text{volume} \cdot \text{densidade}$$

$$M = \frac{4\pi}{3} \cdot R^3(t) \cdot \rho(t)$$

*Substituindo M em (D1)*

$$E = \frac{1}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{G}{R(t)} \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot R^3(t) \cdot \rho(t)$$

*multiplicando por 2*

$$2E = 2 \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{G}{R(t)} \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot R^3(t) \cdot \rho(t) \right]$$

$$2E = \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{8\pi G}{3} \cdot R^2(t) \cdot \rho(t)$$

*divididos por  $R^2(t)$*

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \cdot \frac{1}{R^2(t)} = \frac{8\pi G}{3} \cdot R^2(t) \cdot \rho(t) \cdot \frac{1}{R^2(t)} + \frac{2E}{R^2(t)}$$

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \cdot \frac{1}{R^2(t)} = \frac{8\pi G}{3} \cdot \rho(t) + \frac{2E}{R^2(t)} \quad (F2)$$

A expansão da esfera é isotrópica aplicando fator de escala e substituindo em (F2)

$$R(t) = a(t) \cdot r$$

$$\left(\frac{1}{a(t)} \frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \rho(t) + \frac{2E}{a^2(t)r^2}$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \rho(t) + \frac{2E}{a^2 r^2} \quad (F3)$$

A equação (F3) é equação de Friedman na cosmologia Newtoniana. Utilizando a Teoria Geral da Relatividade um conteúdo energético curava o espaço então:

$$\frac{2E}{r^2} = -Kc^2$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \rho(t) - \frac{Kc^2}{a^2} \quad (4.7)$$

## REFERÊNCIAS

- [1] E. R. Harrison, “Cosmology, the Science of the Universe”, Cambridge UP(1995).
- [2] Jean-Pierre Verdet, “Uma História da Astronomia”, Jorge Zahar Editor, tradução de Fernando Py, Rio de Janeiro (1991).
- [3] G. A. Bornheim (org.), “Os Filósofos Pré-Socráticos”, Editora Cultrix, São Paulo (1985).
- [4] R. A. Martins, “O Universo (Teorias sobre sua Origem e Evolução)”, Editora Saraiva, 2ª. Edição (2012).
- [5] G. A. Bornheim (org.), obra citada [3], pag. 22.
- [6] N. Copérnico, “As Revoluções das Orbes Celestes, Trad. de A. D. Gomes e G. Domingues, Coleção Textos Clássicos Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (1979).
- [7] P. Lucie, “A Gênese do Método Científico”, Ed. Campus Ltda., 2a. Edição, Rio Janeiro (1978).
- [8] J. A. S. Lima & R.C. Santos, “100 Anos de Cosmologia Relativística (1917-2017). Parte I: Das Origens à Descoberta da Expansão Universal (1929)”, Revista Brasileira de Ensino de Física, **40**, nº 1, e 1313 (2018), arxiv.:1709. 03693
- [9] K. S. Oliveira Filho & M. F. O. Saraiva, “Astronomia & Astrofísica”, 3a. ed. São Paulo, Editora Livraria da Física, Volume 1 (2014).
- [10] Newton Project, “Letter from Newton to Richard Bentley”, December 10th, 1692. Ver também [8].
- [11] M. J. Crowe, “Modern theories of the Universe” (from Herschel to Hubble), Dover publication, New York (1994).
- [12] A. Einstein, “Os Fundamentos da Teoria da Relatividade Geral” (1916). Artigo traduzido do alemão para o português na Coleção Textos Fundamentais de Física Moderna, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, (1971) pg. 141.
- [13] A. Einstein, “Os Fundamentos da Teoria da Relatividade Geral” (1916). Artigo traduzido do alemão para o português na Coleção Textos Fundamentais de Física Moderna, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, (1971) pg. 225.
- [14] A. Friedmann, “On the Curvature of Space” (1922), traduzido do alemão para o inglês em Cosmological Constants (papers in modern cosmology), Eds. J. Bernstein e G. Feinberg, Columbia University, New York, p. 49 (1986). Ver também, A. Friedmann, “On the Possibility of a World with Constant

- Negative Curvature” (1924), traduzido em *Cosmological Constants*, p. 59 (1986).
- [15] G. Lemaître, "Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques", *Annals of the Scientific Society of Brussels (in French)* **47A**, 41(1927). Ver também a tradução parcial para o inglês feita por Lemaître: "A Homogeneous Universe of Constant Mass and Growing Accounting for the Radial Velocity of Extragalactic Nebulae", *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.* **91**, 483 (1931).
- [16] A. Eddington, "*The Mathematical Theory of Relativity*" Cambridge, 2a. Edição, p. 162 (1924).
- [17] E. P. Hubble, "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", *Proceedings of the National Academy of Sciences United States of America* **15**, 168 (1929).
- [18] E. P. Hubble, "The Realm of the Nebula", Dover publications, 2a. Edição (1958).
- [19] A. Daminieli, "A expansão do Universo", Editora Odysseus, São Paulo (2003).
- [20] K. S. Oliveira Filho & M. F. O. Saraiva. "Astronomia & Astrofísica", Livraria da Física, São Paulo (2004).
- [21] <http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm>.
- [22] <http://www.if.ufrgs.br/fatima/glossario.htm>.
- [23] J. Lépine, "A Via Láctea, nossa ilha no Universo", Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo,(2008)
- [24] W. Herschel, "On the Construction of the Heavens", *Monthly Notices of Royal Society of London* **75**, 213 (1785).
- [25] V. Trimble, "Anybody but Hubble", Department of Physics and Astronomy University of California,(2012).
- [26] G. Lemaître, "The Expanding Universe" *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **91**, 490 (1931).
- [26] S. Weinberg, "Gravitation and cosmology", John Wiley & Sons, Inc., New York (1972).
- [27] H.N. Russell, "Relations Between the Spectra and Other Characteristics of the Stars", *Popular Astronomy* **12**, 275 (1914).
- [28] <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node2.htm>.

- [29] H.S. Leavitt & E.C. Pickering, “Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud”, Harvard College Observatory **173**, 1 (1912).
- [30] R.E. Souza, “Astrofísica Galáctica e Extragaláctica”, AGA 299– IAG/U (2013).
- [31] M.A. Hoskin, “The 'Great Debate': What Really Happened”, Journal for the History of Astronomy **7**, 169 (1976).pag33
- [32] I. Waga , “ A Expansão do Universo “ Revista Brasileira de Ensino de Física **22**, 157 (2000). Pag36
- [33] H. Shapley, “Globular Clusters and the Structure of the Galactic System”, Astronomical Society of the Pacific **30**, 42(1917).pag 39
- [34] H. Shapley & H.D. Curtis, “The Scale of the Universe”, Bulletin of the of National Research Council **2**, 171 (1921).
- [35] <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/galaxias.htm>
- [36] M.S.Silva, ” Estudo da Função de Luminosidade de Galáxias”, SENAI CIMATEC. (2013).
- [37] <http://ventosdouniverso.blogspot.com.br/search?q=lei+de+hubble>
- [38] E.P. Hubble, “Cepheids in Spiral Nebulae”, American Astronomical Society **33**, 252 (1925).
- [39] V. Trimble, “Ho : The Incredible Shrinking Constant 1925—1975 “, Astronomical Society of the Pacific **108**, 1073 (1996).
- [40] I. Waga , “ Cem anos de descobertas em cosmologia e novos desafios para Século XXI “ Revista Brasileira de Ensino de Física **27**, 157 (2000).
- [41] A. Bagdonas, J. Zanetic, & I. Gurgel, “ Quem descobriu a expansão do Universo? Disputas de prioridade como forma de ensinar cosmologia com uso da história e filosofia da ciência” Revista Brasileira de Ensino de Física **39**, 1 (2017).
- [42] <http://www.pnas.org/content/101/1/8.figures-only>.
- [43] J.A.S. Lima, “Cosmologia ,Quinessência e Aceleração do Universo”, REVISTA USP **62**,134 (2004).
- [44] [https://apod.nasa.gov/debate/1996/sandage\\_hubble.html](https://apod.nasa.gov/debate/1996/sandage_hubble.html).
- [45] A. van Maanen, “ Preliminary evidence of internal motion in the spiral nebula”, Proceedings of the National Academy of Sciences **2** , 386 (1916).

- [46] <http://www.sedis.ufrn.br/bibliotecadigital/site/interativos/calculo-aplicado/Inicio.html>.
- [47] <http://astro.if.ufrgs.br/rad/rad/rad.htm>.
- [48] <http://www.if.ufrgs.br/mpef/ieeefis/Lang/Dimensoes%20cosmologicas.pdf>
- [49] L.Sodré Jr., “Introdução a Cosmologia: 1- A cosmologia Newtoniana”, Aula em PDF (2011).
- [50] L.Sodré Jr., “Cosmologia básica: 2 – As Equações Friedmann-Lemaitre “ Aula em PDF (2011).
- [51] A. Marcel Jr., “Pré-Socráticos A invenção da Razão “, Editora Odysseus, São Paulo (2003).
- [52] M. Zingano, “Platão & Aristóteles “, Editora Odysseus, São Paulo (2002).
- [53] C.A. Roman, “História Ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge volume I Das Origens à Grécia”, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro (1997).
- [54] Jean- Pierre Vernant , “As Origens do Pensamento Grego “, Editora Bertrand Brasil Ltda., Rio de Janeiro (2006).
- [55] I.B. Cohen ,” O Nascimento de uma Nova Física” Publicações Gradiva, Lisboa (1988).
- [56] J.M.F. Bassalo, “Nascimento da Física (1901 – 1950)”, EDUFPA, Belém (2000).
- [57] G. Galilei, “ O Mensageiro das Estrelas” , Ediouro, Dueto Editorial Ltda, São Paulo (2009).
- [58] C. Sagan, ” O Mundo Assombrado pelos Demônios”, Companhia das letras, São Paulo (2006).
- [59] <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/galaxias.htm>.
- [60] J. Horvath, G. Lugones, M.P. Allen, S. Scarano Jr. & R. Teixeira “Cosmologia Física “, Editora Livraria da Física, São Paulo (2007).