UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS DEPARTAMENTO DE FÍSICA

CARLOS AUGUSTO FERREIRA

MEDIDAS DE DISTÂNCIA EM ASTRONOMIA E A EVOLUÇÃO DE NOSSA CONCEPÇÃO DE UNIVERSO

> VITÓRIA 2014

CARLOS AUGUSTO FERREIRA

MEDIDAS DE DISTÂNCIA EM ASTRONOMIA E A EVOLUÇÃO DE NOSSA CONCEPÇÃO DE UNIVERSO

Monografia apresentada ao Curso de Física do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Física.

Orientador Prof. Dr. Sérgio Mascarello Bisch.

VITÓRIA 2014

CARLOS AUGUSTO FERREIRA

MEDIDAS DE DISTÂNCIA EM ASTRONOMIA E A EVOLUÇÃO DE NOSSA CONCEPÇÃO DE UNIVERSO

Monografia apresentada ao Curso de Física do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Física.

Aprovada em 07 de março de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Júlio César Fabris

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Sérgio Mascarello Bisch Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Prof. Dr. Thieberson da Silva Gomes Universidade Federal do Espírito Santo

RESUMO

A Astronomia e a Cosmologia são as áreas da Ciência que buscam estudar o Universo em grande escala, sendo um de seus problemas centrais a determinação das dimensões dos astros e das distâncias até eles. O conhecimento das reais dimensões dos astros, do espaço que os separa, das dimensões do Universo como um todo e de nossa posição dentro dele vem moldando a evolução de nossas concepções e modelos acerca do Universo, desde a Antiguidade. O presente trabalho visa, justamente, apresentar alguns momentos marcantes da história do esforço humano para compreender e medir as dimensões espaciais do Universo, algumas vezes por meio da consideração também de sua dimensão temporal, bem como alguns dos principais conceitos, métodos e técnicas utilizados neste esforço, e o impacto de seus resultados na evolução de nossa visão acerca do Universo.

O trabalho começa com a Astronomia desenvolvida no mundo antigo, no Egito, na Mesopotâmia e na Grécia, passando pela obra de Erastóstenes e Aristarco de Samos. O primeiro estabeleceu a medida da circunferência da Terra e, o segundo, se preocupou em determinar a distância que separa a Terra da Lua e do Sol. Em seguida falamos do importante passo dado pela Astronomia nas pessoas de Ptolomeu, Nicolau Copérnico, Tycho Brahe, Kepler, Galileu e Isaac Newton. Em seguida nos referimos à Cosmologia do Abade Lemaître, o modelo de Alexander Friedman, a relatividade de Albert Einstein e a contribuição de Edwin Hubble, que culminou na descoberta da Expansão do Universo. Achamos importante, em um capítulo a parte, falarmos sobre a evolução estelar. Fechamos a narrativa com a apresentação das ferramentas que auxiliam na determinação das distâncias, principalmente as unidades de medida, como o parsec e o ano-luz. Das técnicas conhecidas, destacamos o método da triangulação ou paralaxe, o uso de variáveis cefeidas e de supernovas como indicadores de distância.

Palavras-chave: medidas de distância, Astronomia, distâncias astronômicas, história da Astronomia

ABSTRACT

Astronomy and Cosmology are areas of science that aim to study the Universe on a large scale. One of their key issues is determining the dimensions of the astronomical objetcs and the distances to them. The knowledge of the actual dimensions of the stars, the space that separates them, the dimensions of the Universe as a whole and our position within it has shaped the evolution of our concepts and models about the Universe since Antiquity. The present work aims to present some highlights of the history of human's effort to understand and measure the spatial dimensions of the Universe, sometimes by also considering their temporal dimension, as well as some of the main concepts, methods and techniques used in this effort, and the impact of its results in the evolution of our vision of the Universe.

The work begins with the Astronomy developed in the ancient world, Egypt, Mesopotamia and Greece, through the work of Eratosthenes and Aristarchus of Samos. The first established the measurement of the circumference of the Earth, and the second engaged to determine the distances between the Earth and the Moon, and the Earth and the Sun. Then we talk about the important steps taken by Astronomy by means of Ptolemy, Copernicus, Tycho Brahe, Kepler, Galileo and Isaac Newton. Then we refer to the Cosmology of Lemaître, the model of Alexander Friedman, the relativity of Albert Einstein and Edwin Hubble contribution, which culminated in the discovery of the expansion of the Universe. We find it important, in a separate chapter, to talk about stellar evolution. We close the narrative with the presentation of the tools that assist in the determination of distances, especially the units of measurement, such as parsec and light-year. Among the known techniques we highlight the method of parallax or triangulation, the use of Cepheid variables and supernovae as distance indicators.

Keywords: distance measurements, Astronomy, astronomical distances, Astronomy history

SUMÁRIO

Introdução	01
1. Uma breve história da Astronomia até o século XXI	02
1.1 Das antigas civilizações a Newton	02
1.1.1 Antigo Egito	02
1.1.2 A Mesopotâmia	03
1.1.3 A Grécia Antiga	04
1.1.3.1 A medida da circunferência máxima da terra	05
1.1.3.2 A distância da Terra à Lua	06
1.1.3.3 A Distância da Terra ao Sol	07
1.1.3.4 O sistema geocêntrico	07
1.1.4 A Astronomia na Idade Média	30
1.1.5 A revolução copernicana	09
1.1.6 O trabalho de Tycho Brahe	11
1.1.7 Kepler encontra o elo perdido	12
1.1.8 O telescópio de Galileu	12
1.1.9 Isaac Newton e a Gravitação Universal	13
1.2 Evolução da Astronomia Estelar	15
1.2.1 Herschel: para além do sistema solar	15
1.2.2 Encontra-se a distância da Terra ao Sol	16
1.2.3 Universos ilhas: para além da Galáxia	19
1.2.4 A expansão do Universo	22
1.2.4.1 O desvio para o vermelho	24
1.2.4.2 A lei de Hubble	25
2 A teoria do Big Bang e o Universo em expansão	28
2.1 A cosmologia do abade Lemaître	28
2.2 A construção do telescópio gigante de Monte Palomar	29
2.3 A teoria do Big Bang	29
2.4 A hipótese da criação contínua	31
3 Noções elementares de formação e evolução estelar	32
3.1 Introdução	32

3.2 A	definição de estrela segundo a astrofísica	32
3.3 O	diagrama de Hertzsprung-Russell	34
3.4 O	nascimento de uma estrela	35
3.5 A	morte das estrelas	36
3.5.1	Nebulosas planetárias	37
3.5.2	Anã branca	38
3.5.3	Novas	40
3.5.4	Supernovas	41
3.5.5	Estrelas de nêutrons	41
3.5.6	Buracos negros	42
4 Fe	rramentas para determinação de distâncias em Astronomia	45
4.1 A	unidade astronômica (UA)	45
4.2 O	ano-luz	46
4.3 O	parsec	47
4.4 O	sistema de magnitudes	48
4.5 L	uminosidade das estrelas	50
4.5.1	Magnitude aparente	50
4.5.2	Magnitude absoluta	51
5 Alg	gumas técnicas para medição de distâncias em Astronomia	53
5.1 In	ntrodução	53
5.2 O	cálculo da distância pelo método da triangulação ou paralaxe	54
5.3 A	constante de Hubble como parâmetro para medição de distâncias	56
5.4 A	s supernovas como indicadores de distâncias cosmológicas	58
5.4.1	Introdução	58
5.4.2	O método	59
6 Co	nsiderações finais	61
Referências		63
Créditos das figuras		65

Lista das figuras

Figura 1 - Ilustração de um merkhet	03
Figura 2 - Ilustração de um gnômon	03
Figura 3 - Ilustração de uma clepsidra	03
Figura 4 - A medida da terra por Erastóstenes	05
Figura 5 - A distância Terra-Lua por Aristarco de Samos	06
Figura 6 - A distância Terra-Sol por Aristarco de Samos	07
Figura 7 - O modelo geocêntrico	08
Figura 8 - O astrolábio	09
Figura 9 - O quadrante	09
Figura 10 - Uma tabela afonsina	09
Figura 11 - O modelo heliocêntrico	10
Figura 12 - O Universo de Tycho Brahe	11
Figura 13 - Telescópios de Galileu	13
Figura 14 - A paralaxe de Marte	18
Figura 15 - Galáxia espiral NGC 4921	22
Figura 16 - Representação gráfica da lei de Hubble	26
Figura 17 - Ilustração das regiões do Sol	33
Figura 18 - Proeminência Solar	34
Figura 19 - Diagrama de Hertzsprung-Russell	35
Figura 20 - O ciclo de vida das estrelas	36
Figura 21 - Nebulosa planetária com a forma de borboleta	38

Figura 22 - Ilustração de uma Anã Branca	40
Figura 23 - Sírio B, a companheira de Sírio	40
Figura 24 - Ilustração de uma Estrela de Nêutrons	42
Figura 25 - Ilustração de um Pulsar	42
Figura 26 - Ilustração de um Buraco Negro	44
Figura 27 - Ilustração de uma massa estelar sendo atraída por buraco negro	44
Figura 28 - Definição de parsec	47
Figura 29 - Determinação da paralaxe estelar heliocêntrica	55
Figura 30 – Velocidade de recessão de galáxias em função da distância	57

INTRODUÇÃO

Quanto mais o tempo passa e mais se acelera o ritmo das perturbadoras descobertas, tanto mais longe, para horizontes vertiginosos, recuam os limites do Universo.

Até mesmo os nossos mais familiares companheiros nos mergulham numa estupefação crescente, à medida que os vamos conhecendo melhor. O Sol, por exemplo, com seus 696.000 quilômetros de raio, que se encontra a 149.600.000 quilômetros de nós e que pesa 322.500 vezes mais do que a Terra, astro que devora a si mesmo, já que transforma, a cada segundo, 500 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio e perde, a cada ano, 20.000 bilhões de toneladas, astro, não obstante, ínfimo perdido entre os milhares de estrelas da nossa galáxia, a 30.000 anos-luz do centro dela (GROUEFF, 1978, p.21).

Há apenas algumas dezenas de anos que os cientistas começaram a explorar as outras galáxias, entre as quais Andrômeda, que se encontra a dois milhões de anos-luz, e que se aglutinam às dezenas ou aos milhares em agrupamentos ora regulares, ora irregulares. Que dizer das novas, estas estrelas que ficam, de repente, tão brilhantes que emitem, em alguns meses, tanta energia quanto o Sol em dez mil anos? E das supernovas que aparecem de tempos em tempos e das quais algumas são, no seu apogeu, muito mais possantes que o Sol? Seria necessário também mencionar os pulsares e os quasares, que os astrônomos estão começando a entender melhor.

Para falar de todos os fenômenos observados, foi preciso encontrar uma nova linguagem. Já não basta o ano-luz, que, no entanto representa 300.000 quilômetros por segundo durante um ano. Os cientistas efetuam atualmente os seus cálculos em parsecs, cada qual equivalendo a 3,26 anos-luz, e também em unidades astronômicas (UA), sendo esta unidade equivalente à distância média entre a Terra e o Sol.

Queremos, neste trabalho, não apenas descrever as técnicas que nos permitem chegar às distâncias astronômicas, mas também apresentar a evolução da Astronomia ao longo de séculos de estudo, até chegarmos à moderna Cosmologia do século XXI.

1. UMA BREVE HISTÓRIA DA ASTRONOMIA ATÉ O SÉCULO XXI

1.1.1 Das antigas civilizações a Newton

1.1.2 Antigo Egito

O Egito, situado no nordeste da África, às margens do rio Nilo, teve o inicio da sua história por volta de 3.500 a.C. Essa antiga civilização criou uma linguagem escrita, os hieróglifos, cujas inscrições eram feitas em papiro, o que tornou os textos e documentos egípcios muito vulneráveis e certamente isto levou à perda de muitas informações.

No calendário egípcio, o ano civil tinha 360 dias, divididos em 12 meses de 30 dias cada um. O ano estava dividido em três estações: a inundação, o inverno (saída das águas) e o verão (falta de água). Além dos 360 dias do ano, consideravam mais cinco dias entre um ano e outro, chamados dias epagómenos. Como o ano civil com 365 dias é mais curto que o ano solar em aproximadamente um quarto de dia, 120 anos após coincidir o início do ano astronômico com o ano civil, o primeiro já estava retardado em um mês sendo necessários 1456 anos para ocorrer nova coincidência (PÓVOA FARIA, 1987, p.23).

Alguns dos instrumentos astronômicos utilizados no antigo Egito eram: o merkhet (Figura 1), feito de nervura de folha de palmeira com um talhe pequeno na parte mais larga, usado para acompanhar o alinhamento de certas estrelas, e o relógio de sol, que era constituído basicamente por uma haste colocada numa superfície plana, dispositivo denominado *gnômon* (Figura 2) pelos gregos, no qual a sombra da haste indicava as horas. Além do relógio de sol, para medir o tempo usavam também a clepsidra (Figura 3), que foi bastante aperfeiçoada por eles. A clepsidra é um marcador de tempo formado por um recipiente cheio de água, com um pequeno orifício por onde lentamente esta se escoa, fazendo com que o seu nível vá descendo e sendo registrado numa escala feita na parede do recipiente, que marca o tempo.

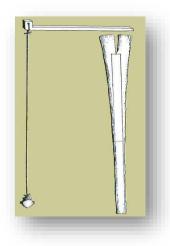






Figura 1: Merkhet.

Figura 2: Gnômon.

Figura 3: Clepsidra.

1.1.3 A Mesopotâmia

Mesopotâmia é o nome dado à região entre os rios Tigre e Eufrates, onde hoje se localiza o Iraque. Os Sumérios foram os primeiros habitantes conhecidos da região, ocupando o sul, onde construíram importantes cidades como Ur, Nippur e Babilônia. Ao norte, os Acádios e os Assírios de origem semita fundaram cidades como Agadé, Assur e Nínive. Foram os Sumérios que inventaram a escrita cuneiforme deixando inscrições em pequenos tijolos de argila gravados com cunha de madeira.

Na astronomia mesopotâmica a matemática desempenhou papel importante. Criaram um sistema sexagesimal de numeração, dividiram o círculo em 360 partes iguais (o grau) e cada uma dessas partes em 60 minutos e cada minuto em 60 segundos. De seus observatórios chamados zigurates, observavam o movimento sistemático dos planetas, do Sol e da Lua, deixando gravadas as suas posições. Verificaram que os planetas são encontrados sempre numa mesma região do céu, numa faixa à volta da eclíptica, onde criaram várias constelações, representando-as por figuras de animais. Esta faixa do céu passou a ser denominada de zodíaco, ou círculo de animais (PÓVOA FARIA, 1987, p.20).

Dispunham de instrumentos rudimentares. O gnômon não passa de uma vara com a qual se observa a sombra: a mais curta marca a hora do meio-dia; a mais longa de todo o ano permitia reconhecer o solstício de inverno, e a mais curta de

todo ano, o solstício de verão. Conheciam também o relógio de água, ou clepsidra, e, sobretudo, o polo, vasta semiesfera cuja parte côncava é voltada para o céu e acima da qual está suspensa uma pequena bola. Basta seguir o movimento da sombra dessa bola sobre a superfície côncava para acompanhar o movimento do Sol e determinar a data dos equinócios e dos solstícios (PÓVOA FARIA, 1987, p.22).

Com a ajuda desses instrumentos, os astrônomos mesopotâmicos determinaram a complicada marcha dos planetas e anotaram cuidadosamente os eclipses desde o século III A.C. Para atender às necessidades da agricultura ou para permitir a entrada regular dos impostos, organizaram um calendário lunar estabelecendo os sete dias da semana, dividindo o dia e a noite em 12 partes iguais. Como 12 meses lunares só totalizam 354 dias, intercalaram periodicamente um décimo terceiro mês para equilibrar a conta (PÓVOA FARIA, 1987, p.21).

1.1.3 A Grécia Antiga

Foi na Grécia antiga que a maneira de encarar e interpretar os fenômenos naturais sofreu uma grande alteração. O homem passou a desenvolver conhecimentos a partir de bases racionais. Por isso a mitologia grega assume grande importância. De fato, é precisamente na mitologia grega, em meados do século VI a.C. que surgem os fundamentos da Astronomia e, muito especialmente, da Cosmologia científicas, baseadas no uso da razão e observação.

É com Tales de Mileto (624 a.C.-548 a.C.), no século VI a.C., que se abre a era das intuições geniais. É certo que Tales ainda acredita que a Terra flutua sobre o oceano, mas já percebe que a Lua brilha porque é iluminada pelo Sol. E torna-se célebre ao predizer com exatidão um eclipse solar. Acima de tudo, é o primeiro a se interrogar sobre o elemento primordial do qual dependem os demais elementos. Para ele tudo nasce da água. Entramos então no domínio das hipóteses racionais. O homem já não aceita as explicações tiradas da superstição ou da mitologia. Procura compreender de que é feito o Universo e como ele nasceu.

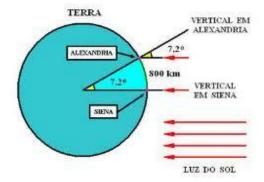
Originário também de Mileto, Anaximandro (610-547 a.C) ensina que a Terra não repousa em nada, mas se mantém suspensa no espaço. Parmênides, nascido entre 530 e 515 A.C, é o primeiro a dizer que a Terra é uma esfera, ao passo que Anaxágoras (500-428 A.C), cinquenta anos mais tarde, descreve os astros do céu

como pedras evoluindo no espaço. Os pitagóricos vão ensinar a existência de várias esferas concêntricas fazendo evoluções em volta da terra, cada uma delas fixa numa das luminárias do céu, o Sol, a Lua e os planetas que giram num ritmo imutável. Preocupados com a harmonia universal, afirmam que todos os movimentos celestes são circulares, teoria que, até chegarmos a Kepler, irá dominar as tentativas de explicar racionalmente o universo.

1.1.3.1 A medida da circunferência máxima da Terra

Há 2.200 anos, o matemático grego Erastóstenes (276-194 a.C) realizou uma proeza: medir o perímetro de uma circunferência que contém um meridiano da Terra.

Erastóstenes fez seu cálculo fundamentado nas seguintes observações: era um fenômeno conhecido desde a antiguidade que em Siene, hoje Assuã, no Egito, no dia de solstício de verão, ao meio-dia, um poço era iluminado até o fundo, ou seja, os raios do sol incidiam verticalmente à superfície terrestre, ao mesmo tempo em que, em Alexandria, a sombra de um obelisco medida neste mesmo dia de solstício, indicava que a distância zenital (distância angular de um ponto ao zênite), era de 7,2°, ou seja, 1/50 da circunferência de um meridiano. Ora, acontece que Siene e Alexandria estão praticamente no mesmo meridiano. Basta conhecer a distância linear entre as duas cidades para determinar o valor de toda circunferência da Terra. Alexandre, o Grande, e, depois dele, os Ptolomeus, tinham mandado medir os caminhos do Egito pelos bematistas, e eles tinham encontrado cerca de 5.000 estádios entre Siene e Alexandria, o equivalente a 800 quilômetros. Por meio de uma simples proporção pode Erastóstenes obter o perímetro da circunferência terrestre (Figura 4). O matemático deduziu que a diferença de 7,2° se devia à curvatura da Terra (VERDET, 1991, p.205).



$$\frac{7.2^{\circ}}{800 \ km} = \frac{360^{\circ}}{P} \implies P = 40.000 \ km$$

Figura 4: A medida da circunferência da Terra.

1.1.3.2 A distância da Terra à Lua

O matemático e astrônomo grego Aristarco de Samos (310-230 A.C) foi o primeiro a lançar a hipótese heliocêntrica (sol no centro do Universo), antecipandose em 1.700 anos ao astrônomo Nicolau Copérnico (1453-1543), autor do primeiro tratado de astronomia heliocêntrica. Aristarco foi também pioneiro no cálculo de distâncias entre corpos celestes. Vamos primeiro entender como Aristarco encontrou a distância entre a Terra e a Lua.

Sendo o Sol mais volumoso que a terra, esta lança no espaço uma sombra em forma de cone cujo ápice está exatamente oposto ao Sol. Estando o Sol mais afastado e a Lua mais próxima, pode-se considerar a porção desse cone de sombra compreendida entre a Terra e a Lua como sendo aproximadamente, um cilindro, cuja secção reta é igual ao diâmetro da Terra. Esta é a sombra que a Lua atravessa por ocasião de um de seus eclipses (Figura 5). Medindo o tempo que a lua eclipsada leva para atravessar a sombra, Aristarco concluiu que esta sombra é cerca de três vezes mais larga que a lua. Conclui-se daí que o diâmetro da lua é um terço do diâmetro da terra (o valor correto é 0,27, mais próximo de um quarto do diâmetro terrestre). Por outro lado, a lua é vista no céu sob um ângulo de meio grau. Para vermos um círculo qualquer sob este ângulo é necessário afastá-lo cerca de 120 vezes o seu diâmetro. Logo a Lua se acha à distância de cerca de sessenta raios terrestres, considerando o diâmetro lunar cerca de um quarto do terrestre (VERDET, 1991, p.216).

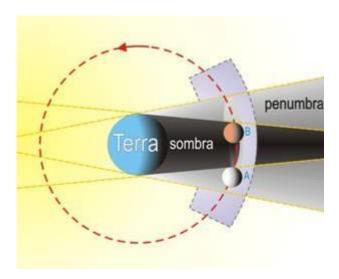


Figura 5 A medida da distância Terra-Lua.

1.1.3.3 A distância da Terra ao Sol

Um dos problemas a que Aristarco de Samos dedicou especial atenção foi a determinação da distância entre a Terra e o Sol. Ele observou que, quando a Lua é avistada da Terra em quarto crescente, os raios solares são perpendiculares à reta que passa pelos centros da Terra e da Lua, conforme mostra a figura abaixo (Figura 6). Conhecendo a medida do ângulo e a distância da Terra à Lua "B", já determinada anteriormente, em termos do raio da Terra, Aristarco calculou a distância "C" (Terra-Sol) usando uma razão trigonométrica simples. Aristarco atribuiu ao ângulo o valor de 87° e daí conclui que o Sol está 19 vezes mais distante que a Lua, enganando-se por um fator de cerca de 20: o Sol está 400 vezes mais distante que a Lua. (VERDET, 1991, p.217).

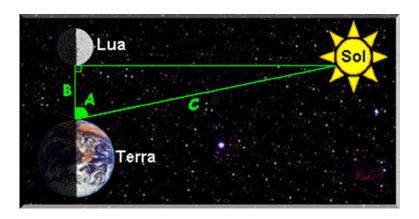


Figura 6: A medida da distância Terra-Sol: $\cos \hat{A} = \frac{B}{C}$

1.1.3.4 O sistema geocêntrico

No coração de Alexandria, capital do império macedônico fundado por Alexandre, o Grande, Ptolomeu I, que governou o Egito de 305 a 285 A.C., funda o célebre museu de Alexandria, com vastos locais de passeio, jardim botânico, zoológico, salas de dissecação, observatório e uma enorme biblioteca que chegou a possuir um acervo de 700.000 obras na época do seu apogeu. Neste ambiente de estudos viveu, no século II d.C., Cláudio Ptolomeu que escreveu a obra "Megale Syntaxis", traduzido pelos árabes por "Almagesto". Partindo da hipótese aristotélica de geocentrismo, criou um modelo geométrico para explicar os movimentos planetários. Nesse modelo, um planeta está em movimento circular num pequeno círculo denominado epiciclo, cujo centro se move à volta da Terra em grandes

circunferências denominadas deferentes. Algumas vezes o centro do deferente não era centrado na Terra, e então a circunferência é dita excêntrica. Uma complicação no modelo é que o centro do epiciclo realizava um movimento circular uniforme com relação a um ponto que não estava nem no centro da Terra nem no centro do deferente, mas sim com relação a um outro ponto, o equante. O equante e a Terra estavam simetricamente dispostos em relação ao centro do deferente (Figura 7).

Os modelos geocêntricos gregos foram utilizados em todos os cálculos até o século XVI. Utilizando o modelo de Ptolomeu, os astrônomos da Idade Média conseguiam prever a posição dos astros com precisão de alguns graus, que era mais do que suficiente para a época (MORAIS, 2009, p.50).

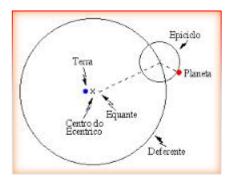


Figura 7 O modelo geocêntrico de Ptolomeu.

1.1.4 A Astronomia na Idade Média

Com o declínio do mundo helênico, a Astronomia entrou em seu próprio período de eclipse. Não há grandes astrônomos romanos e pouco progresso foi feito antes do aparecimento da ciência árabe e a fundação da escola de Astronomia de Bagdá, em 813 d.C., por al-Ma'mun (ROONEY, 2013, p.158). Em 1175 o ocidente redescobre o "Almagesto" de Cláudio Ptolomeu numa primeira tradução latina de Gerardo de Cremona. Aristóteles também reaparece e, a partir do século XIII, suas obras são consideradas como verdades reveladas, principalmente pelo trabalho de Santo Tomás de Aquino (1275-1274). Os sábios creem como ele que o mundo esta dividido em duas zonas radicalmente diferentes: a zona sublunar, onde tudo é submetido à "corrupção", no sentido de imperfeição e mudança, e a zona supralunar, onde tudo é imutável e perfeito. Uma noção que, infelizmente, terá vida longa e irá congelar a Astronomia até o inicio do século XVI. O único progresso real que se

pode creditar à civilização ocidental nesse período, diz respeito aos instrumentos utilizados pelos astrônomos. O astrolábio (Figura 8), o quadrante (Figura 9) e as tábuas afonsinas (Figura 10) vão contribuir para dar impulso à navegação (GROUEFF, 1978, p.36).





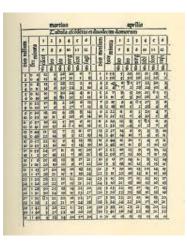


Figura 8: Astrolábio.

Figura 9: Quadrante.

Figura 10: Tabela afonsina.

1.1.5 A revolução Copernicana

A união do pensamento grego com o cristão dá-se o nome de "pensamento escolástico". Era esta a forma de ver e compreender o mundo que nos cerca que era ensinada nas universidades europeias do século XV. A partir do século XVI, o pensamento escolástico começa a ser subvertido com o Renascimento. Para isto contribuirá a transição do geocentrismo para o heliocentrismo que tem como figura de frente o monge polonês Nicolau Copérnico (1473-1543).

A revolução iniciada por Copérnico foi, acima de tudo, uma revolução intelectual, a qual, com a proposta de que o Sol se situa no centro do Sistema Solar e de que a Terra orbita em sua volta, aboliu a velha ideia de um universo completamente antropocêntrico, centrado na Terra. Esta revolução durará cerca de 150 anos e envolve cinco personalidades bem conhecidas hoje: o próprio Nicolau Copérnico, Tycho Brahe (1546-1601), Johannes Kepler (1571-1630), Galileu Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1727). Copérnico viveu entre 1473 e 1543. No ano de sua morte publicou a obra "De Revolutionibus Orbium Coelestium", na qual propõe o Sol como centro imóvel do Universo, estrutura esta que recebeu o nome de sistema heliocêntrico (Figura 11). À sua volta girariam os planetas, exceto a Lua, que giraria em torno da Terra. Esta também giraria em torno do Sol com todos os

planetas no mesmo sentido, de oeste para leste. Neste sistema as órbitas dos planetas ainda são circulares, não abandonando a ideia de perfeição do círculo. A ordem de colocação dos planetas segue o mesmo raciocínio que no modelo geocêntrico, quanto mais lento fosse o movimento desse planeta entre as estrelas, mais distantes estaria do Sol. Também mantém as esferas das estrelas fixas, pois acredita que o universo é finito. Este modelo de universo sofreu forte contestação por parte da igreja sendo inclusive proibido pela Inquisição.

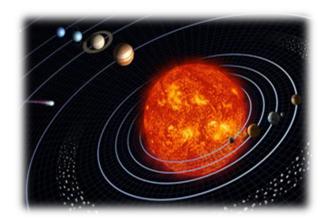


Figura 11: O modelo heliocêntrico.

Muito tempo irá se passar antes que a humanidade tome conhecimento da revolução copernicana. Estranhamente, o "De Revolutionibus" cairá na indiferença. Foram necessários 30 anos de pesquisa para sua composição. Durante todo o século XVI o nome de Copérnico permanecera quase ignorado. A ciência oficial, representada na época por católicos e protestantes, usa argumentos bíblicos para resistir à nova revolução.

Somente em 1584 irá surgir o primeiro discípulo real de Copérnico. Chama-se Giordano Bruno (1548-1600) que vai ainda mais longe que Copérnico, pois crê em um universo infinito e povoado por uma infinidade de mundos semelhantes ao nosso. Conhece bem a obra do velho mestre de Frauenberg e torna-se seu divulgador e entusiasta. Chega mesmo a classificar o Sol como uma estrela entre as demais. Não é medroso. Não precisa esperar 49 anos para se decidir a publicar suas ideias. Não teme chocar o mundo, mas a 19 de fevereiro de 1600 é queimado vivo numa praça pública de Roma. Eu lembro então de meu falecido avô: "Mais vale um cão vivo que um leão morto". Mais tarde Galileu confirmaria que havia aprendido a lição. Imaginando as chamas que envolveram Giordano compreende-se melhor o

receio do cônego Nicolau Copérnico em desafiar o poder da igreja e esperado estar no seu leito de morte para permitir a divulgação de suas ideias.

1.1.6 O trabalho de Tycho Brahe

Ainda no século XVI viveu Tycho Brahe (1546-1601). Brahe foi o diretor do primeiro grande centro de pesquisa astronômica na Europa, na ilha de Ven, na época pertencente à Dinamarca, terra natal deste notável cientista. Este centro chamado Uraninburgo, ou "castelo dos céus", iria se tornar o primeiro observatório moderno. Tycho Brahe também propôs, com base em suas observações, um modelo de universo, ainda geocêntrico, mas com a particularidade de os planetas se deslocarem em volta do Sol. Em 1572, Tycho Brahe localizou uma supernova na constelação de Cassiopéia. Esta supernova foi visível à noite por 15 meses, atingindo uma luminosidade equivalente à do planeta Vênus. Tycho também observou um cometa em 1577. Abaixo, o seu modelo de universo.

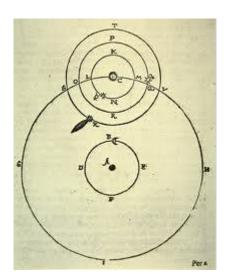


Figura 12: O universo de Tycho Brahe.

1.1.7 Kepler encontra o elo perdido

Em 1600, em Praga, Tycho Brahe conheceu um jovem astrônomo e matemático que, no futuro, iria trabalhar com ele como assistente. Chamava-se Johannes Kepler (1571-1630) que passou a usar os dados de Brahe para mostrar que os planetas não se moviam em círculos perfeitos.

Ao contrário de Brahe, Kepler acreditava na teoria de Copérnico por tê-la estudado na escola com seu mentor de matemática. Kepler parecia atraído pela simplicidade do universo heliocêntrico, mesmo que ele fosse ainda menos preciso do que a antiga cosmologia geocêntrica de Ptolomeu. Kepler consertou este defeito em 1609 ao anunciar que os planetas movem-se em órbita elíptica e não circular. Depois de anos de trabalho duro, Kepler quebrou o universo circular imposto por Ptolomeu e Copérnico. A teologia católica estava muito próxima de mudar sua forma de ver o universo, mas não sem antes cometer mais uma injustiça, como veremos a seguir.

1.1.8 O telescópio de Galileu

O italiano Galileu Galilei (1564-1642), amigo do Papa Urbano VIII, correu o risco de morrer queimado como Giordano Bruno, em 1600. Em 1609, no mesmo ano em que Kepler publicou a sua "Nova Astronomia", Galileu soube que um fabricante de lentes holandês, Hans Lippershey (1570-1619), tinha inventado uma maneira de fazer objetos distantes parecerem mais próximos. Galileu imediatamente construiu um desses novos instrumentos e apontou-o para o céu (Figura 13). Provavelmente foi o primeiro a usar um telescópio para fins científicos (ROONEY, 2013, p.171).

Para todos os lados que olhava, via evidências de que a cosmologia aristotélica estava errada. Suas descobertas iam sistematicamente destruindo o que restava do universo idealizado pelo grande Aristóteles (384-322 A.C).

Virando o telescópio para Júpiter, Galileu descobriu quatro corpos que orbitavam o planeta gigante. Aqui estava a prova indiscutível de que nem tudo gira em torno da Terra. Se estas luas distantes giravam em torno de Júpiter, ignorando a Terra, era difícil imaginar que a Terra fosse realmente o centro do universo. O telescópio foi a grande arma da primeira revolução cosmológica e Galileu a empunhava com habilidade, derrubando, um após outro, os conceitos de Aristóteles.

As observações de Galileu convenceram-no de que Aristóteles estava errado e Copérnico estava certo. Infelizmente sua observação científica iria terminar em uma acusação de heresia.

Em 1616, o Cardeal Bellarmine, chefe da inquisição romana, chamou Galileu a seu gabinete. O Cardeal alertou Galileu para o fato de que seguir as ideias de Copérnico era heresia e tentou alertá-lo a não sustentar ou defender estas ideias. A divulgação do seu "Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo" levou Galileu a ser condenado pela inquisição, em 1633, como herege. Galileu prudentemente retratou-se e foi para uma prisão domiciliar, em vez de ir para a fogueira. Como um favor de seu velho amigo Urbano VIII, foi permitido que sua pena se cumprisse em sua própria casa e não em uma masmorra fria e úmida no Vaticano.



Figura 13: Telescópios de Galileu.

1.1.9 Isaac Newton e a gravitação universal

Isaac Newton (1642-1727) nasceu em Woolsthorpe, no Lincoln Shire, Inglaterra. Estudou no Trinity College em Cambridge, não sendo um aluno brilhante. Devido a um grave surto de peste, a Universidade encerrou as atividades por diversos períodos, entre 1665 e 1666. Este período coincide com uma época de excepcional produção intelectual por parte de Newton. Foi durante este intervalo que

trabalhou sozinho e lançou a semente do trabalho que iria desenvolver nos anos seguintes, nas áreas de ótica, dinâmica e matemática.

Em 1669, Newton sucedeu Isaac Barrow como professor de Matemática na Universidade. Será em 1687 que Newton publicará "Princípios Matemáticos de Filosofia Natural". Trata-se de uma obra em três livros, englobando todo conhecimento existente até então sobre o movimento dos corpos e suas causas. Em particular, no livro III, Newton expõe o seu sistema de mundo, onde esta a Lei da Gravitação Universal. A obra de Newton estabelecerá a união definitiva entre a física terrestre e a física celeste.

A lei de Newton da gravitação estabelece que o valor da força de atração entre duas partículas de massas m₁ e m₂, atuante ao longo da linha que une as duas partículas, é dada por:

$$F_{12} = G \; \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \; ,$$

onde "d" é a distância que separa as partículas. A constante G, chamada de constante da gravitação universal, foi determinada experimentalmente em 1798 por Henry Cavendish (1731-1810). No SI o seu valor aproximado é:

$$G = 6,67.10^{-11} m^3. s^{-2}. kg^{-1}$$

Esta é a força responsável pelo nascimento das estrelas, pelo movimento dos planetas, cometas, das estrelas nas galáxias e pelo agrupamento de galáxias em aglomerados.

1.2 Evolução da Astronomia Estelar

1.2.1 Herschel: para além do Sistema Solar

William Herschel (1738-1822) nasceu em Hanôver. Passou vários anos de sua vida construindo telescópios cada vez mais potentes, inclusive um de 6 metros de distância focal, que instalou no jardim de sua casa. Iniciou seus estudos em Astronomia aos 35 anos de idade quando teve que, não só aprender Matemática, mas também os grandes problemas com os quais se depararam os astrônomos do seu tempo. Entre estes problemas estava o que dizia respeito à dimensão do sistema solar.

Assestando os seus telescópios em todas as direções, Herschel descobre 2.500 nebulosas. Quanto mais observa esses estranhos corpos celestes, mais acredita que as nebulosas encontram-se a distâncias inimagináveis, bem além da Via-Láctea. Descobriu que a luz de milhares de estrelas levam milhões de anos para chegar até a Terra, podendo muitos destes astros ter deixado de existir antes que sua luz pudesse chegar até nós (GROUEFF, 1978, p.154). Só podemos vê-las porque sua luz continua viajando mesmo após sua fonte ter desaparecido. De 1770 aos primeiros anos do século XIX, Herschel já havia efetuado mais de 3.000 operações de localização de estrelas da Via-Láctea. Na noite de 13 de março de 1781, descobre o planeta Urano (CAMARA, 1985, p.55). Seis anos mais tarde, descobre dois de seus satélites: Titânia e Oberon, e finalmente, dois anos mais tarde, descobrem duas luas de Saturno: Mimas e Encélado.

Por volta de 1830 o astrônomo Francês Bouvard percebe uma irregularidade na órbita de Urano. Há um desvio em sua órbita de aproximadamente 20 segundos de arco. O francês Urbain Le Verrier (1811-1877) alega que a ocorrência é devido à existência de um planeta além de Urano. Calcula a posição deste hipotético planeta. A 25 de setembro de 1846 no observatório de Berlim, o astrônomo Johann Gottfried Galle (1812-1910) descobre o planeta Netuno na posição prevista por Le Verrier.

A descoberta de Netuno trouxe outro problema, pois também este astro não se "encaixava" na órbita calculada. Conclusão: havia um nono planeta responsável por esta anomalia na órbita de Netuno. Em 18 de Fevereiro de 1930, Clyde Tombaugh (1906-1997), descobre Plutão (CAMARA, 1985, p.58), embora, verificou-

se depois, ele não fosse o responsável pelas supostas perturbações na órbita de Netuno, sendo, como se sabe atualmente, apenas um representante de miríade de astros denominados "transnetunianos", situados além da órbita de Netuno.

Outro famoso astrônomo, Edmund Halley (1656-1742) observa as posições de três estrelas desde sempre conhecidas, Aldebarã, Sírio e Arcturo, percebendo que elas já não estão no lugar onde Ptolomeu as havia fixado em seu Almagesto. Realmente, desde o tempo de Hiparco elas sofreram um deslocamento de 20 minutos de arco. Isto quer dizer que as estrelas se movem e o Universo está em movimento. Além dessa descoberta, Halley constata que um cometa observado por ele em 1682 possuía as mesmas características dos que foram vistos em 1607 e 1531.

Halley desconfia ser este cometa, o mesmo que aparece a cada 75 anos aproximadamente. Verifica que cometas parecidos foram vistos em 1456, 1380 e 1305. Não tem dúvida de que se trata do mesmo cometa e prediz seu reaparecimento em 1759. Na noite de natal deste ano, 16 anos após a sua morte, o astrônomo amador alemão, de nome Palitzsch, o vê. Sabe-se agora que os cometas obedecem a uma lei periódica e batiza-se este cometa de "Cometa Halley" em homenagem ao astrônomo que o estudou (MATSUURA, 1985, p.112).

William Herschel faleceu em 25 de agosto de 1822 aos 84 anos. Seu filho John Herschel (1792-1871) continua seu trabalho. Também constrói telescópios, descobre 525 nebulosas e 3347 estrelas duplas no Hemisfério norte descobrindo ainda 1700 nebulosas e 2000 estrelas duplas no hemisfério sul.

1.2.2 Encontra-se a distância da Terra ao Sol

Desde Kepler já se conheciam as grandes leis que regiam o funcionamento do sistema solar, porém os astrônomos do tempo de Luís XIV não sabiam com precisão as distâncias da Terra ao Sol, ou da Terra aos demais planetas conhecidos na época. Os antigos já haviam atacado o problema e entre eles estava naturalmente Aristarco de Samos, já comentado anteriormente. Seu cálculo, apesar de avançado para sua época, estabelecia que o Sol estivesse 19 vezes mais afastado da Terra que a Lua, quando na verdade este valor é de 400 vezes. Este

erro leva Aristarco a concluir que o Sol é aproximadamente 254 a 368 vezes mais volumoso que a Terra quando na verdade este valor é de um milhão e 300 mil vezes. O próprio Kepler começa por afirmar que o Sol se encontra a 1200 raios terrestres da Terra e a Lua a 60 raios, ou seja, uma relação 20 para um. Depois corrige esta relação para 60 para 1, o que ainda não representa senão um sétimo da distância real. Um após o outro, todos os sábios de algum renome atacam o problema sem conseguir pôr-se de acordo. Na verdade, os seus cálculos variam alarmantemente, sendo necessário encontrar uma solução para o problema. O princípio é relativamente simples: desde Copérnico já se conheciam as distâncias relativas entre os planetas e o Sol. Faltava serem descobertas as distâncias absolutas. Calculando a distância do Sol à Terra, as outras distâncias poderiam ser deduzidas e as dimensões do sistema solar seriam finalmente conhecidas. A distância do Sol à Terra seria mais tarde chamada de unidade astronômica (UA).

Para calcular a distância de um corpo celeste é preciso determinar a *paralaxe* desse corpo, ou seja, o ângulo sob o qual o objeto em questão é visto aqui da Terra. Reservamos uma secção especial para discutirmos esta técnica. Para isto basta visar o corpo a partir de dois pontos cuja posição relativa tenha sido determinada e calcular o ângulo obtido entre as direções das duas linhas de visada.

Infelizmente esse ângulo é muito pequeno e diminui mais ainda à medida que o objeto vai ficando mais afastado da Terra, tornando quase impossível medi-lo com precisão. Por exemplo, sabemos que o Sol se encontra a 149.664.900 km da Terra, demasiado longe para, com os meios existentes na época, encontrar-se a paralaxe correta (GROUEFF, 1978, p.147).

Já que o Sol é inacessível, é preciso visar um planeta menos afastado, Marte ou Vênus, por exemplo, no momento em que estejam em posição mais próxima possível do nosso planeta. É necessário também, para obter-se o maior ângulo possível, que a partir da Terra, os pontos a partir dos quais são feitas as visadas estejam o mais afastado possível um do outro. Em 1672, Marte deveria estar o mais perto possível da Terra e a Academia de Ciências de Paris estava decidida a aproveitar a ocasião para finalmente encontrar a distância da Terra ao Sol.

A oito de fevereiro de 1672, o astrônomo francês Jean Richer (1630-1696) sai de La Rochelle rumo a Caiena, na Guiana Francesa. A partir de agosto de 1672 e

durante mais de dois meses, com a ajuda de um setor de 2 metros, mede a distância angular do planeta em relação às estrelas vizinhas. Durante este mesmo período, em Paris, na latitude de 45 graus, outros três cientistas, Giovanni Cassini (1625-1712), Jean Felix Picard (1620-1682) e Olaus Romer (1644-1710) se entregam às mesmas observações. Os resultados das duas observações simultâneas seriam publicados apenas em 1684. De posse das medidas, Cassini estimou a paralaxe de Marte como sendo 15 segundos de arco, usando como linha de base a distância entre Caiena e Paris (Fig. 14). Considerando que Marte está a 1.52 unidades astronômicas do Sol, estimou em 140 milhões de km o valor da UA. O valor correto é de 149,597870691 milhões de km. Com o aprimoramento das técnicas, pouco a pouco ia se chegando ao valor mais preciso (OLIVEIRA FILHO, 2004, p.138).

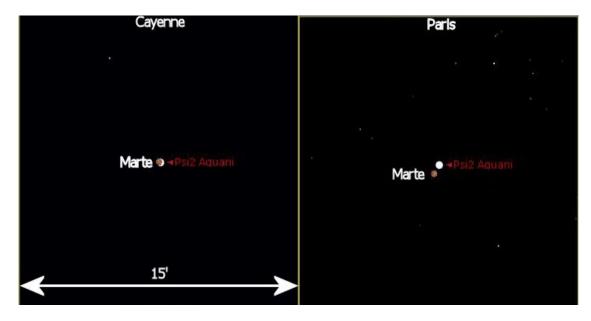


Figura 14: A paralaxe marciana.

1.2.3 Universos ilhas: para além da Galáxia

O que são as nebulosas? Seriam por acaso arquipélagos de estrelas situados nos confins da nossa galáxia, a Via-Láctea, a única de cuja existência se tinha certeza? Ou haveria para além da Via-Láctea, fora de nosso universo outras galáxias parecidas? Era o que afirmavam alguns astrônomos. Nesse caso, as nebulosas seriam universos separados, diferentes do nosso, tão longe que só apareceriam como pequenas manchas difusas. Não se sabia a resposta. E como descobri-la se não se sabia a distância das nebulosas longínquas? Contudo a Astronomia havia feito progressos extraordinários e, nos últimos anos, encontrara um meio de determinar a distância das estrelas relativamente afastadas. Só que esse método, que será discutido mais tarde, dependia da presença nestes aglomerados, de um tipo especial de estrela, as variáveis cefeidas, que servem como uma espécie de vela padrão de distância. O primeiro instrumento que iria permitir ao homem observar o Universo para além dos limites de nossa galáxia foi instalado na cidade de Pasadena, na Califórnia, em um lugar chamado Monte Wilson, estrategicamente com 1700 metros de altura, ideal para observações noturnas em uma região onde as noites eram límpidas 300 dias por ano. O refletor Hooker instalado no observatório, com 2,50 metros de diâmetro, abriu o caminho para a cosmologia moderna. Este telescópio gigante entrou em funcionamento em 1917.

Em 1919 chega a Pasadena Edwin Powell Hubble (1889-1953). Ele havia trocado o Direito pela Astronomia e, após participar como combatente na primeira guerra mundial, chega ao Monte Wilson. Seu principal interesse eram as nebulosas espirais, assunto que apaixonava os astrônomos da época. O celebre astrônomo Camille Flamarion (1842-1925) já acreditava serem as nebulosas, "arquipélagos de estrelas".

O primeiro catálogo das nebulosas, compreendendo 1.000 nebulosas e conglomerados de estrelas, foi o que Willian Herschel apresentou à Royal Society em 1786. A segunda edição contava com outros 1000 corpos aos quais se juntaram 500 nebulosas em 1802. Seu filho, John Herschel que observou o céu austral do Cabo da Boa Esperança, na África do Sul, publicou o primeiro catálogo geral das nebulosas em 1864, englobando 5.079 corpos, dos quais 4.630 tinham sido descobertos pelos dois Herschel. Foi completado e substituído pelo novo catálogo

geral das nebulosas e aglomerados de estrelas, conhecido pela sigla "NGC", publicado em 1888 por John Louis Emil Dreyer (1852-1926). Esse catálogo, bem como os dois suplementos publicados em 1905 e 1908, sob o nome Catálogo Index, são utilizados até os nossos dias. As nebulosas são identificadas pelo seu número NGC ou IC. (FARIA, 1987, p.151).

A solução definitiva das nebulosas deparava-se com um obstáculo que parecia intransponível: a medida das distâncias que sempre representava uma das dificuldades fundamentais em Astronomia. Apesar da sua importância capital, a medida das grandes distâncias sempre se efetuava segundo métodos sem muita precisão. Para pequenas distâncias o método da paralaxe ou triangulação levava a resultados razoáveis. As paralaxes de estrelas situadas a 326 anos-luz, mesmo não ultrapassando um centésimo de segundo de arco, ainda permitia uma medida relativamente precisa da sua distância. Mas, para além dessa distância, as paralaxes são demasiado insignificantes e de difícil medida.

Somente em 1918 a Astronomia ganharia um método para medir grandes distâncias acima de 326 anos-luz. A partir de 1908, uma astrônoma de Harvard, Henrietta Leavitt (1868-1921) começou a estudar estrelas variáveis na Pequena Nuvem de Magalhães. Várias centenas de estrelas variáveis acabavam de serem descobertas na Pequena Nuvem. A maioria delas havia sido identificada como do tipo cefeida (GROUEFF, 1978, p.188). Miss Leavitt observou uma coisa curiosa. As cefeidas que pareciam mais brilhantes eram aquelas cuja pulsação era mais lenta. Miss Leavitt prosseguiu nesse trabalho durante quatro anos e catalogou perto de um milhar de cefeidas na Pequena Nuvem com magnitude e períodos variáveis, descobrindo haver uma relação matemática entre a magnitude aparente da estrela e o período de variação luminosa. Já que as cefeidas da Pequena Nuvem podiam ser consideradas como estando todas a uma mesma distância da Terra, Miss Leavitt acabava de descobrir uma poderosa maneira de passarmos da magnitude aparente para a magnitude absoluta, e, por consequência, à distância. A única condição era calibrar a relação a partir de uma cefeida próxima, cuja magnitude absoluta fosse possível calcular, visto que, na ocasião, ainda não se conhecia a que distância estavam as Nuvens de Magalhães. O conhecimento da magnitude absoluta de uma cefeida permitiria, por meio da relação de Miss Leavitt, conhecer a magnitude absoluta de qualquer outra cefeida (VERDET, 1991, p.224).

A primeira calibragem desta nova descoberta foi obtida em 1913 por Ejnar Hertzsprung (1873-1967). Ele determinou de início a distância média de 13 cefeidas galácticas utilizando-se de suas paralaxes. Em seguida calculou a magnitude absoluta média das 13 cefeidas e comparou-as com o período da variação de brilho, o que lhe permitiu conseguir a primeira medida em números da relação entre período e magnitude aparente. Cinco anos mais tarde Harlow Shapley (1885-1972) retomou os cálculos de Hertzsprung e revisou-os à luz de novos conhecimentos obtidos sobre as estrelas variáveis. O resultado foi a primeira tabela de relação entre o período de variação luminosa e a magnitude absoluta das cefeidas. A partir de então, a Astronomia passou a dispor de uma tabela para medir distâncias de astros. Daí em diante onde quer que se descubra uma cefeida, o seu período de variação luminosa indicaria sua magnitude absoluta e, assim, o seu brilho aparente nos daria a distância do grupo estelar do qual a cefeida faz parte. Depois de aprofundados estudos sobre os aglomerados globulares, utilizando o método das cefeidas para determinação de distâncias, Shapley concluía que a nossa galáxia tinha a forma de um disco cujo diâmetro era de 300.000 anos-luz, com o centro situado a 50.000 anos-luz do Sol e com espessura central de 30.000 anos-luz. O Sol estava relegado a uma posição excêntrica, ou seja, ele nem estava no centro.

Mas o novo método não servia de grande coisa quando se tratava das misteriosas espirais, pois nenhuma cefeida havia jamais sido distinguida nessas confusas nebulosas. A história mudou quando Edwin Hubble descobriu uma cefeida na nebulosa de Andrômeda. Essa cefeida fotografada em outubro de 1923 aparecera na chapa como um corpo pálido de magnitude aparente 18,2. Quando Hubble a examinou mais de perto, descobriu que se tratava de uma estrela variável cujo período de variação luminosa era de um mês o que corresponde a uma estrela 7.000 vezes mais luminosa que o Sol. Hubble calculou sua distância segundo a tabela Hertzsprung-Shapley e estimou que Andrômeda estava a 900.000 anos-luz da Terra, sendo esta a maior distância até então conhecida em Astronomia. Não havia dúvida, Andrômeda estava muito além dos limites da nossa galáxia. Existem sim, fora do nosso universo e separados dele por distâncias inimagináveis, vários outros mundos. São os universos-ilhas profetizadas por William Herschel (VERDET, 1991, p.225).



Figura 15: Galáxia espiral NGC 4921, onde diversas variáveis cefeídas foram observadas, permitindo melhorar a estimativa de distância até o aglomerado de galáxias da Coma, do qual ela faz parte, e da própria taxa de expansão do Universo, após a medida de seu *redshift*.

1.2.4 A expansão do universo

De um dia para o outro a imagem do que se chama de Universo ou Cosmos mudou radicalmente. O espaço que encerra nas suas fantásticas imensidões a totalidade da matéria existente dilatara-se subitamente em proporções nunca antes imaginadas. Não havia dúvida de que a medida das distâncias das nebulosas foi uma descoberta importante para os que procuravam determinar a natureza, a origem e a organização do Universo. O passo seguinte desta evolução era conhecer a composição química dos astros, a sua temperatura, a sua densidade e se eles se deslocavam. Em caso afirmativo, em que direção e a que velocidade.

Com efeito, o homem pudera desde longo tempo observar que a luz solar passando por um prisma formava um espectro com todas as cores do arco-íris. Mas não suspeitava de que este espectro oferecesse informações extremamente

preciosas a respeito do Sol. Mais tarde o homem observou que toda a luz, não apenas a do Sol, mas de qualquer corpo celeste, se decompunha num espectro cujas cores eram sempre as mesmas dispostas na ordem que ia do vermelho ao violeta. Um dia descobriu que enquanto os corpos sólidos e líquidos davam espectros contínuos os dos gases eram formados por linhas brilhantes sobre o fundo negro. Essa diferença permitia desde já, estabelecer se a fonte luminosa, uma nebulosa, por exemplo, era gasosa, ou não.

A descoberta determinante nesse domínio teve lugar em 1815, quando o físico alemão Joseph Von Fraunhofer (1787-1826) descobriu um grande número de listas verticais pálidas ou bem pronunciadas no espectro solar fazendo passar um feixe de luz pelo seu telescópio e depois por um grande prisma. Depois observou os espectros produzidos pelo aquecimento de diversos elementos químicos encontrando muitas linhas já observadas no espectro solar. Só que em vez de serem negras como no caso do espectro solar, as listas pareciam claras. Percebeu então que havia uma relação entre a luz solar e as riscas observadas nos espectros dos elementos químicos analisados no laboratório. A explicação para este fenômeno foi dada em 1859 por dois físicos de Heidelberg, Robert Bunsen (1811-1899) e Gustav Kirchhoff (1824-1887). Em seu laboratório, num bico de Bunsen, aqueceram sódio e examinaram o espectro obtido. Como Fraunhofer, observaram duas listas claras nas posições marcadas sobre o espectro solar pela letra D. (GROUEFF, 1978, p.194).

Depois, fizeram passar raios solares através dos vapores de sódio: não apenas as linhas D apareceram em negro, como eram mais acentuadas e largas. O sódio quando atuando como fonte luminosa, emitia linhas D claras, mas, quando os seus vapores filtravam a luz de outra fonte, neste caso o Sol, as listas D apareciam em preto. Kirchhoff e Bunsen concluíram daí que o vapor de sódio absorvia os raios provenientes do espectro contínuo emitido pelas camadas mais internas do Sol, ao passo que o vapor era perfeitamente transparente a todos os outros raios visíveis. No lugar da luz absorvida, apareciam listas negras. Foi assim que a explicação das linhas de Fraunhofer proporcionou o meio de analisar a composição química de todas as fontes luminosas. Nascia assim a espectroscopia.

Foi o astrônomo inglês Sir Willian Huggins (1824-1910) quem se tornou o grande pioneiro da espectroscopia e o primeiro a analisar os espectros de várias

estrelas e nebulosas. Em 1863 ele combinou uma chapa fotográfica de colódio com o espectroscópio ligado ao seu telescópio e obteve o primeiro espectrograma de uma estrela. Os espectros mostraram que uma estrela não continha nenhum elemento químico além da centena de elementos conhecidos na Terra. Revelaram que toda a matéria existente no universo era constituída principalmente por hidrogênio, e que a diferença entre elas residia na quantidade de hidrogênio que elas continham e nos fenômenos nucleares a que estavam submetidas.

1.2.4.1 O desvio para o vermelho

O austríaco Christian Doppler (1803-1853) observou um curioso fenômeno: o som de um trem se torna cada vez mais agudo (alto) quando o mesmo se aproxima da estação e cada vez mais grave (baixo) quando ele se afasta. Em 1841 ele estabeleceu o princípio segundo o qual a altura do som percebida varia quando a fonte se desloca em relação ao observador. Este fenômeno ficou conhecido como efeito Doppler. O francês Hippolyte Fizeau (1819-1896) estendeu esse princípio à ótica. Confirmou que não apenas ondas sonoras, mas também ondas pelas quais a luz se propaga sofrem alterações de comprimento quando a fonte luminosa se desloca. Sir William Huggins se encarregou de aplicar essa nova descoberta ao espectro das estrelas. Comparando atentamente os espectros de certas estrelas com espectros obtidos em laboratório, Huggins observou uma alteração nas raias, ou seja, havia um "shift", ou desvio, que era às vezes para o azul e às vezes para o vermelho. Quando as raias são desviadas para o azul (blueshift), o desvio deveria ser atribuído a um efeito Doppler-Fizeau de aproximação, e quanto maior fosse o desvio, maior deveria ser a velocidade da estrela. Ao contrário, quando as raias são desviadas para o vermelho (redshift), podemos concluir que o astro se afasta de nós, e o tamanho do desvio fornece a velocidade de afastamento do corpo celeste. Usando o redshift um astrônomo muito conhecido na época, Vesto Melvin Slipher (1875-1969), que trabalhava no observatório Lowell, mediu as velocidades das galáxias. Dispondo de aparelhos fotográficos mais aperfeiçoados e de filmes mais rápidos, Slipher conseguiu obter um espectro bem legível de Andrômeda.

Nesse espectro as raias tendiam para o azul. Mediu este desvio e calculou uma velocidade de aproximação de 284 km por segundo. Em 1914 já tinha medido a

velocidade de 14 nebulosas e, contrariamente ao que o espectro de Andrômeda mostrava, os desvios eram para o vermelho. Para uma delas chegou a encontrar uma velocidade de afastamento de 1.100 km/s. Esses resultados foram apresentados à Sociedade Astronômica Americana em agosto de 1914, em Evanston. Sentado no auditório estava um jovem advogado que havia decidido ser astrônomo. Seu nome era Edwin Hubble, já citado. Dez anos mais tarde, enquanto Hubble media as distâncias das nebulosas em Monte Wilson, Slipher, em Flagstaff, determinava a velocidade radial dessas nebulosas. Por volta de 1925 já se conheciam as velocidades de 45 nebulosas.

1.2.4.2 A Lei de Hubble

Sabia-se na época que o método para distâncias usando cefeídas como vela padrão não funcionava para galáxias mais distantes, pois os telescópios mais potentes daquele tempo não conseguiam discernir estrelas identificáveis como cefeidas. Era preciso procurar outra técnica. Foi quando Hubble propôs uma.

Hubble supôs que mesmo as estrelas mais brilhantes de qualquer nebulosa espiral não ultrapassavam um teto de luminosidade absoluta. Deduzindo assim o valor da magnitude absoluta das estrelas mais brilhantes, Hubble sugeriu utilizar a luminosidade aparente dessas estrelas quando comparada à sua luminosidade absoluta, e aplicando a lei da variação da intensidade luminosa com o inverso do quadrado da distância, como um critério que forneceria uma estimativa das distâncias das galáxias nas quais possam ser identificadas estrelas individuais. Por volta de 1928, Hubble tinha medido por este método a distância de várias nebulosas cuja velocidade havia sido calculada por Slipher. Porém seu método não podia ser aplicado a nebulosas cujas estrelas mais brilhante não haviam ainda sido identificadas. Porém na noite de cinco para seis de outubro de 1923, Hubble identifica uma cefeida entre a miríade de estrelas de Andrômeda e pode determinar a sua distância com maior precisão.

O estudo das galáxias tinha indicado a Hubble que a sua luminosidade absoluta, tomando-se as galáxias como unidades globais não oscilava mais que 4 ou 5 magnitudes acima ou abaixo de uma magnitude absoluta média de -15,2. Essa média não seria válida para os casos individuais, mas valeria estatisticamente

quando se considerasse um número muito grande de galáxias. A média da luminosidade aparente da nebulosa inteira poderia servir de critério para medir-lhe a distância.

Aplicando, pois as três técnicas, cefeidas, estrela mais brilhante e luminosidade total das nebulosas, Hubble determinou a distância de 24 das 46 galáxias cuja velocidade havia medido. Hubble então traçou um gráfico anotando as distâncias na abscissa e as velocidades em ordenada (Figura 16). Ele percebeu que havia uma relação entre as duas grandezas. Esta relação ficou conhecida como Lei de Hubble: "Quanto mais distante estiver a galáxia, maior será a sua velocidade". O sucesso de seu trabalho deveu-se em grande parte, à atuação do maior perito em espectroscopia das galáxias da época. Seu nome era Milton Humason (1891-1972). Foi ele quem mediu os *redshifts* das nebulosas para que Hubble pudesse calcular as velocidades e distâncias. Era assistente de Hubble em Monte Wilson.



Figura 16: Representação gráfica da Lei de Hubble.

A lei descoberta por Hubble teve consequências importantes para o progresso da Astronomia, pois oferecia um novo método para medidas de distâncias. A inclinação da reta, que passou a ser denominada "constante de Hubble", que corresponde à taxa segundo a qual a velocidade de recessão de uma galáxia aumenta com a distância, iria ser, a partir daí, um importante instrumento de estudos sobre as galáxias.

A descoberta dessa relação e do fato de que todas as nebulosas se distanciam rapidamente uma das outras, assumia um significado revolucionário em

Cosmologia. Hubble acabava de descobrir que todo o universo estava em expansão e que as galáxias fugiam a velocidades vertiginosas. Restava descobrir se a taxa de crescimento desta expansão era positiva, negativa ou nula. Em 2011 o prêmio Nobel de física foi entregue a três pesquisadores que descobriram a aceleração da expansão do universo analisando supernovas distantes do tipo 1A. São eles: Saul Perlmutter (1959-), Brian Schmidt (1967-) e Adam Riess (1969-). Esses cientistas descobriram que a expansão não estava indo mais devagar, como se acreditava até então, mas se acelerando. Eles traçaram o mapa da expansão do universo por meio de análise de um tipo especial de supernova. Eles descobriram que a luz emitida por mais de 50 supernovas distantes era mais fraca que o esperado. Um sinal de que o universo estava se expandindo a uma taxa acelerada. Acredita-se que a aceleração seja impulsionada pela energia escura, um dos grandes mistérios do universo que ainda está em estudo (NOBELPRIZE.ORG, acesso em 23 fev 2012).

2. A TEORIA DO "BIG BANG" E O UNIVERSO EM EXPANSÃO

2.1 A cosmologia do abade Lemaître

O universo é estático e imutável? Teve um começo ou sempre existiu? O espaço é infinito? No início deste século os sábios que faziam estas perguntas eram matemáticos. Entre eles estava um cônego belga cujo nome era Georges Lemaître (1894-1966). Partindo do trabalho de Hubble, chegou à conclusão de que o universo inteiro estava em expansão (MORAIS, 2009, p.133). Agora, qual era a forma do espaço? A teoria da relatividade admite três possibilidades que, numa analogia bidimensional, podemos descrever como: o espaço euclidiano onde, os raios de luz viajam em linha reta; o espaço de curva positiva, como numa superfície esférica, onde a luz se propaga em arcos de círculos fechados, e o espaço de curva negativa, semelhante à superfície de uma sela, onde os raios seguem curvas abertas. Conforme o modelo que se aceite, pode-se optar por um espaço finito (a esfera) e infinito (a sela) (GROUEFF, 1978, p.222). O universo idealizado por Albert Einstein (1879-1955) era um sistema onde o espaço é curvo, sendo a massa dos corpos a responsável por esta curvatura. Assim Einstein explica a gravitação não como uma força e sim por uma deformação do espaço ao redor dos astros. Segundo Einstein o seu universo não evoluía com o tempo, ou seja, era um universo estático. Como as suas equações não se enquadravam em um universo estático Einstein foi obrigado a inventar uma força hipotética chamada "constante cosmológica" ou "repulsão cósmica", cuja finalidade era manter estático o universo imaginado por ele.

Em 1922, o matemático russo Alexander Friedman (1888-1925) constatou que a equação original de Einstein sobre a gravidade estava correta e a equação modificada pela constante cosmológica possuía um erro. Einstein havia dividido sua equação original por uma quantidade que podia ser zero, e sabemos que a divisão por zero não é permitida (MORAIS, 2009, p.134). Friedman concluiu que a existência de um universo em expansão era perfeitamente possível. Em 1927, Lemaître apresentou à sociedade científica de Bruxelas uma comunicação de dez páginas e meio intitulada "Um universo homogêneo, de massa constante e raio crescente levando em conta a velocidade radial das nebulosas extragalácticas". O afastamento das nebulosas é um efeito cósmico devido à expansão do espaço. Apenas três anos após a formulação de suas ideias, ele formulou a hipótese do

átomo primitivo, o estado mais simples possível a ser tomado como ponto de partida para um Universo em expansão.

2.2 A construção do telescópio gigante de Monte Palomar

O telescópio Hale do observatório de Monte Palomar no sul da Califórnia, é dotado de um espelho de 5 metros de diâmetro, sendo um dos mais poderosos instrumentos de observação ótica do céu. A ideia de sua construção partiu do astrônomo George Ellery Hale (1868-1938). A fundação Rockfeller iria financiar a construção e o instituto Carnegie garantiria a sua utilização. A obra teve início em junho de 1928. O espelho de 5 metros levou 16 anos para ser fabricado (de 1931 a 1947). No dia 3 de junho de 1948, sem a presença de seu idealizador, já falecido, é inaugurado o observatório de Monte Palomar.

O caminho para os confins do universo estava aberto, pois este refletor era capaz de fotografar objetos celestes situados a um bilhão de anos-luz nas galáxias mais brilhantes. Graças a ele, podia-se ver uma vela a 25.000 km de distância e fotografá-la a uma distância três vezes maior.

2.3 A teoria do Big Bang

As possibilidades do telescópio Hale eram imensas. O refletor de 5 metros de abertura podia recolher tanta luz quanto um milhão de olhos humanos. Penetrava as profundezas do espaço quatro vezes mais longe do que o telescópio de 2,50 metros instalado em Monte Wilson. Finalmente Hubble e Humason poderiam confirmar a surpreendente constatação de Hubble, segundo a qual o *redshift* das galáxias aumentava proporcionalmente à sua distância, o que tornaria a lei de Hubble universal e comprovaria que o Universo esta em expansão.

Em princípios de 1951, Humason já conseguira obter espectros de aglomerados de galáxias fugindo a 60.000 km por segundo. Isto representa 1/5 da velocidade da luz. Os resultados confirmavam a relação entre a velocidade de recessão das galáxias e a sua distância. Humason esperava poder obter em breve espectros de aglomerados de galáxias situadas a 500 milhões de anos-luz. Hubble acreditava que, quando as distâncias exatas desses aglomerados fossem medidas,

elas teriam indicações que permitiriam verificar se a lei do *redshift* se afastava da relação estritamente linear e, nesse caso, se a expansão havia se acelerado ou se tornado mais lenta. Esses dados forneceriam uma estimativa da idade do universo ou o tempo que se passara desde que a expansão tivera início.

Um dos cientistas que se interessou pelo assunto foi George Gamow (1904-1968). Ele foi aluno de Friedman e um dos autores da teoria do Big Bang. Gamow explicava que o Universo está atualmente em expansão porque durante um período de sua história ele se contraíra até atingir uma grande densidade. Este estado inicial de alta densidade e elevada temperatura foi denominado singularidade. Depois se expandira impelido por forças formidáveis criadas pela compressão da matéria. Esta teoria para a criação do Universo passou a ser chamada de Big Bang. Este nome originou-se com um comentário sarcástico do astrônomo inglês Fred Hoyle (1915-2001) em 1949. A equipe de Gamow situou a ocorrência do Big Bang, após várias correções, a um valor em torno de 14 bilhões de anos que é a idade do universo aceita hoje pela comunidade científica. Esta teoria tinha muitos pontos em comum com a hipótese do átomo primitivo do abade Lemaítre. Mas enquanto o cosmólogo belga estivera entre os primeiros a sugerir a ideia de uma supercondensação de toda a matéria, ou de um universo de raio zero, a sua descrição de substância primordial não era compartilhada por todos os colegas. Lemaítre a via como um átomo; Gamow, ao contrário, achava que a matéria original cuja densidade e temperatura eram ilimitadas, se compunha de partículas subatômicas em movimento muito rápido para poderem unir-se e formar núcleos estáveis. Segundo ele nenhum átomo nem mesmo um núcleo de átomo existia ainda (ROONEY, 2013, p.202).

O principal argumento contra a teoria do Big Bang foi que deveria haver alguma radiação térmica restante do evento original que poderia ser detectável. Gamow formulou a hipótese de que, com a expansão do universo, essa radiação teria se "resfriado", passando para a banda das microondas. A confirmação veio em 1965, com a descoberta acidental da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, por dois radioastrônomos, Arno Penzias (1933-) e Robert Wilson (1936-). Esta descoberta não apenas rendeu a seus descobridores o Nobel de Física de 1978, como também confirmou a evidência do Big Bang. A radiação de fundo do Universo é o sinal eletromagnético proveniente das regiões mais distantes do universo e que havia sido prevista por Gamow nos anos 1940. A estimativa de Gamow era de que

haveria um resfriamento que faria a radiação ser semelhante à de um corpo negro a 5 graus acima do zero absoluto. Quando Penzias e Wilson descobriram a CMBR (Cosmic Microwave Background Radiation) eles verificaram que a temperatura correspondente era, na realidade, de 2,7 graus acima do zero absoluto (SEIFE, 2007, p.77).

2.4 A hipótese da criação contínua

Esta ideia nasceu em Witley (Inglaterra) nas conversas de três físicos teóricos de Cambridge que trabalhavam no projeto de radar do governo britânico durante a segunda guerra mundial: Fred Hoyle (1915-2001), Thomas Gold (1920-2004) e Hermann Bondi (1919-2005). Estes três cientistas opunham-se definitivamente à ideia de uma explosão original acontecida há vários bilhões de anos, quando toda a matéria existente se achava comprimida num grau fantástico de densidade. É preciso observar que nessa época, os partidários do Big Bang estavam preocupados com a contradição entre a data do nascimento do Universo, que segundo Hubble, era de dois bilhões de anos, com as recentes descobertas geológicas que datavam a idade da Terra em quatro bilhões de anos. A Terra não poderia ser mais velha que o universo. Hoje sabemos que o universo possui cerca de 14 bilhões de anos

Em 1948, Bondi e Gold publicam na revista Royal Astromical Society, a sua versão chamada "Teoria do Estado Estacionário do Universo em Expansão", na qual Bondi e Gold haviam introduzido uma noção nova: "O Princípio Cosmológico Perfeito". Esse princípio postulava a existência de um universo homogêneo e estacionário em grande escala que se renova sozinho sem cessar. A imagem do cosmos, segundo esta teoria, seria idêntica para todos os observadores, onde quer que eles se encontrassem; além disso, era independente do tempo. O pensamento de Hoyle apenas se diferenciava no fato de que a criação contínua e o universo estacionário eram consequências de uma modificação matemática que ele aplicava à teoria geral da relatividade (BARROW, 1995, p.38).

A guerra entre as duas principais escolas cosmológicas da época, a do Big Bang e da criação contínua, duraria cerca de 20 anos, até que a descoberta da radiação de fundo pôs fim à teoria da criação contínua.

3. NOCÕES ELEMENTARES DE FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO ESTELAR

3.1 Introdução

As estrelas nascem, vivem e morrem. Enchendo o firmamento noturno como faróis num oceano de escuridão, guiaram os nossos pensamentos ao longo de milênios até o porto seguro da razão. Foi na tentativa de compreender o movimento das estrelas e dos planetas que o espirito humano pela primeira vez concebeu a ideia de lei natural. As estrelas, porém, não são apenas objetos de investigação científica. Tal como o Sol e a Lua, estão incrustadas em nosso inconsciente. Sentimos sua presença mesmo sem as vermos.

Neste capítulo iremos fazer uma panorâmica daquilo que os astrofísicos aprenderam acerca do nascimento e vida das estrelas, concluindo com os fatos que levam à sua morte espetacular. É importante também não esquecermos que as estrelas são membros de uma sociedade muito maior – a galáxia – que nutre o seu nascimento e recebe seus despojos após a sua morte.

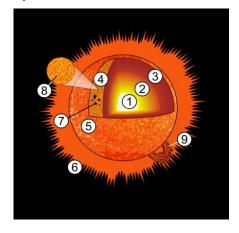
3.2 A definição de estrela segundo a Astrofísica

Segundo os astrofísicos, as estrelas são esferas de gás quente, principalmente hidrogênio e hélio, cuja coesão é assegurada pela gravidade. Como as partículas do gás estão ionizadas, devido à alta temperatura, o gás encontra-se num estado denominado "plasma", um gás de partículas ionizadas, onde os efeitos elétricos e magnéticos desempenham papel importante em seu comportamento, produzindo, por exemplo, no caso do nosso Sol, as manchas solares.

Uma vez que a intensidade das forças gravitacionais é proporcional à massa, quanto maior for a massa das estrelas, tanto mais intensas serão as forças que tendem a fazer com que a estrela entre em colapso. Durante a sua vida, a estrela está submetida a um equilíbrio dinâmico entre a gravidade que tenta produzir o seu colapso, e as forças de expansão geradas pela enorme pressão do gás no interior da estrela, devido à alta temperatura e a liberação de energia térmica que este colapso gera. Este equilíbrio de forças é responsável pela estabilidade temporária da estrela (PAGELS, 1990, p.38). De onde provêm a energia térmica? Qual é a fonte de energia estelar?

A principal fonte de energia das estrelas provém de reações nucleares que ocorrem em seu interior. Nestas reações os núcleos de hidrogênio fundem-se, dando origem a núcleos mais pesados de hélio. Essa transformação de hidrogênio em hélio será responsável pela evolução da estrela. É por isto que toda a sua evolução está relacionada com a massa total do material de que a estrela é feita. Com efeito, o enorme peso devido a toda a massa da estrela a fazer pressão sobre o núcleo, comprime os núcleos dos átomos de hidrogênio uns contra os outros. Além de estarem submetidos a uma pressão elevada, a conversão de energia potencial gravitacional em energia térmica durante o colapso da estrela, faz com que seu núcleo atinja uma temperatura suficientemente alta para acender a fornalha termonuclear que transforma hidrogênio em hélio, processo este que gera energia térmica e, em consequência, o equilíbrio dinâmico mencionado anteriormente. Do resultado deste jogo de forças, gravidade versus pressão interna produzida pela alta temperatura, resulta a expansão ou contração da estrela.

A fornalha nuclear de hidrogênio pode alimentar uma estrela com a massa do Sol durante milhares de milhões de anos e a fusão de outros elementos pode prolongar este período. Durante o período de fornalha nuclear, as estrelas parecem estáveis, mas, de fato, seu núcleo vai se contraindo, porém muito lentamente. Por fim as estrelas devem morrer, devido à implacável compressão gravitacional e ao fato de sua fonte de energia ser finita. O interior de uma estrela como o nosso Sol pode ser visualizado como uma série de camadas. A fornalha nuclear situa-se no núcleo central. A camada que envolve o núcleo transfere a radiação para as camadas convectivas exteriores que, por sua vez, transportam a energia térmica para a superfície.



✓ Regiões do nosso Sol:

- 1) Núcleo
- 2) Zona de radiação
- 3) Zona de convecção
- 4) Fotosfera
- 5) Cromosfera
- 6) Coroa
- 7) Mancha solar
- 8) Grânulos
- 9) Proeminência solar.

Figura 17: Regiões do Sol.

As manchas solares na superfície são manifestações de grandes e intensos campos magnéticos. Uma coroa solar de gás quente e brilhante, visível durante os eclipses, circunda o Sol.

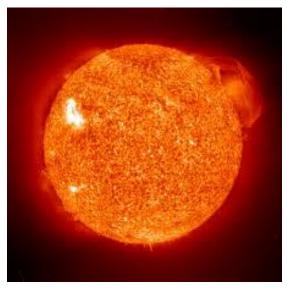


Figura 18: Proeminência solar (lado direito da figura).

3.3 O diagrama Hertzsprung-Russell

A luz de uma estrela transporta inúmeras informações importantes, dentre elas a sua cor, que pode ir do avermelhado ao azulado, e sobre sua luminosidade. A cor está relacionada com a temperatura da superfície, implicando numa cor azulada para temperaturas muito elevadas e a cor avermelhada para temperaturas mais baixas. A luminosidade, definida pelos astrônomos, corresponde à energia total liberada pela estrela por unidade de tempo, ou seja, corresponde à potência total liberada pela estrela na forma de radiação eletromagnética. Se fizermos um gráfico da luminosidade em função da temperatura de um grande número de estrelas, encontraremos uma região estreita ao longo da qual se dispõe a maior parte das estrelas. Este gráfico ficou conhecido como "Diagrama de Hertzsprung-Russell" (Fig. 19), no qual a região estreita onde se situa a maioria das estrelas, das mais brilhantes e quentes até as mais frias e de fraco brilho, é conhecida como "sequência principal" (MARAN, 2011, p.178).

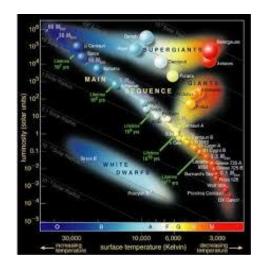


Figura 19: Exemplo de diagrama de Hertzsprung-Russel.

Conhecer a localização de uma estrela neste diagrama nos diz se a estrela tem muita ou pouca massa, fato que determina a sua evolução. Enquanto a estrela permanece queimando hidrogênio em seu núcleo, ela se move lentamente ao longo da linha da sequência principal, contudo, quando este combustível se esgota no núcleo, a estrela acaba se afastando da sequência principal, deslocando-se para regiões como as dos ramos das estrelas gigantes ou supergigantes, ou das anãs brancas (Fig. 19), atingindo uma altura de sua vida em que podem ocorrer acontecimentos dramáticos, como colapsos, ejeção das camadas mais externas e explosões em supernovas, dependendo de sua massa.

3.4 O nascimento de uma estrela

Considera-se, atualmente, que as estrelas se formam a partir de grandes nuvens de gás e poeira interestelar, existente dentro das galáxias. Estas nuvens, chamadas nebulosas, possuem densidades variáveis em várias de suas regiões, podendo estas atrair gravitacionalmente para si gases e partículas de poeira que existem à sua volta. Estes glóbulos de matéria que assim se formam atraem cada vez mais matéria, tornando-se mais densos. Parte da energia térmica associada à movimentação rápida das moléculas gasosas é emitida principalmente na região do infravermelho, fazendo com que a contração gravitacional do glóbulo se torne mais facilitada e aumente sua temperatura central.

Supondo um glóbulo com massa semelhante à do Sol e de tamanho cerca de três vezes as dimensões do sistema solar, após cerca de 10 milhões de anos, depois de uma contração significativa, a temperatura no interior da já então protoestrela chega a cerca de 12 milhões de graus, suficiente para que comecem a ocorrer, em seu interior, reações termonucleares, transformando núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio, com intensa liberação de energia radiante. À medida que isto acontece, a temperatura aumenta no interior da massa gasosa, fazendo com que a pressão do gás e da radição seja suficiente para frear a contração gravitacional. Um estado de equilíbrio é então atingido, originando uma nova estrela. O processo descrito se processa num intervalo de tempo que depende da massa da nuvem gasosa que inicialmente deu origem à estrela. Quanto maior a massa, mais rápido é o processo. Com o movimento de rotação associado, que deveria existir no glóbulo inicial, a contração dará origem a um disco de matéria em rotação. Deste disco, através de condensações de outros pequenos glóbulos, poderão eventualmente formarem-se planetas girando em torno da estrela.



Figura 20: Exemplos de ciclos de vida de estrelas, que dependem fortemente de sua massa inicial.

3.5 A morte das estrelas

Após milhões de anos a queimar hidrogênio e a convertê-lo em hélio, acabase o combustível de hidrogênio no núcleo da estrela. Recordemos que a fornalha nuclear alimenta as elevadas temperaturas que permitem à estrela resistir ao colapso gravitacional. Quando o fogo se apaga, a estrela entra em um novo colapso. Os astrofísicos preveem três possíveis destinos para as estrelas que entram em colapso. Tornar-se uma anã branca, uma estrela de nêutrons ou um buraco negro. Podemos acrescentar também os estágios que antecedem a estes três anteriores,

as nebulosas planetárias e as supernovas. Inclusive a categoria 1A de supernovas, que é atualmente usada como padrão para medida de distâncias em Astronomia.

O destino da estrela depende de sua massa inicial. As estrelas com massa inicial inferior a 8 massas solares tornam-se anãs brancas. As estrelas de massa compreendida entre 8 e 25 massas solares, sofrem uma explosão dando origem a uma estrela de nêutrons. As estrelas que possuem uma massa compreendida entre 25 e 100 massas solares, transformam-se em um buraco negro, objeto do qual a própria luz não consegue escapar (OLIVEIRA FILHO, 2004, p.202).

3.5.1 Nebulosas Planetárias

Uma nebulosa é uma nuvem de gás e poeira no espaço. Entende-se por "poeira" partículas sólidas microscópicas que podem ser feitas de rochas de silicato, metais, carbono, gelos ou várias combinações dessas substâncias; o "gás" é essencialmente hidrogênio e hélio. Nebulosas tem papel primordial na formação de estrelas. Algumas se formam a partir de estrelas em seus estágios terminais, quando estas ejetam para o espaço suas camadas externas.

Em estrelas com massa semelhante ou um pouco maior que a do nosso Sol, quando o hélio começa a queimar, formando carbono, a temperatura se eleva no núcleo. O excesso de energia é emitido como fótons os quais são absorvidos pelo gás e sopram as camadas mais externas para fora. A continuidade deste processo faz com que as camadas mais externas sejam perdidas transformando-se numa camada fria e fina suficiente para ser transparente. Este objeto se chama "Nebulosa Planetária".

Estrelas centrais de nebulosas planetárias são pequenas estrelas no centro da nebulosa. Elas são restos de estrelas ao estilo do Sol. A nebulosa, composta de gás que uma estrela expeliu no decorrer de dezenas de milhares de anos, expandese, apaga-se e desaparece deixando para trás a estrela original que acaba se tornando uma anã branca.



Figura 21 Nebulosa planetária com a forma de borboleta.

3.5.2 Anã Branca

Estrelas que, ao final de sua vida, contém massa menor que 1,4 vezes a massa do Sol (limite de Chandrasekhar), após passarem pelo estágio de gigante vermelha e de nebulosa planetária, contraem-se até chegarem a uma condição estável, sustentada pela pressão de seus elétrons que se tornam tão próximos que não podem mais ser comprimidos, atingindo o chamado estado degenerado da matéria. O brilho da estrela torna-se então mais fraco, devido ao seu pequeno tamanho e ela passa a ser chamada de "anã branca". Neste estágio, a matéria está muitíssimo comprimida. Uma anã branca com massa aproximadamente igual à do Sol possui volume equivalente ao volume da Terra. Com o passar do tempo, devido ao seu resfriamento pela emissão de radiação e por não terem mais condições de prosseguir os processos nucleares, a anã branca torna-se uma anã negra.

A história da descoberta de anãs brancas começa em 1844, no observatório de Königsberg, na antiga Prússia, quando Friedrich W. Bessel (1784-1846) viu oscilar a imagem de Sírio, a estrela mais brilhante do céu. O que poderia causar a oscilação de uma estrela? Bessel concluiu que Sírio estava acompanhada por outra estrela escura e de grande massa que, à medida que orbitava, atraia Sírio, produzindo um movimento oscilante na respectiva posição no céu. Bessel não viu esta estrela escura, mas, confirmando seu palpite, 19 anos mais tarde Alvan Clark (1804-1887) localizou a companheira de Sírio ao testar uma nova lente de 45 cm. No

entanto havia algo estranho na companheira de Sírio. Em 1910 Henry Norris Russell, um dos formuladores do diagrama de Hertzsprung-Russell, notou que esta estrela não se enquadrava na sequência principal. Pediu então ao astrônomo Edward Pickering (1846-1919) para lhe obter o espectro da companheira de Sírio. Nos sete anos seguintes foram descobertas mais duas estrelas que eram também exceção à regra. Também não estavam na sequência principal.

De um modo geral, as estrelas de brilho fraco deveriam ter a cor vermelha enquanto a companheira de Sírio era de um branco incandescente. A única explicação para o brilho tênue era a sua pequena dimensão. Porém, sendo tão pequena, não deveria ter massa suficiente para influenciar o movimento de uma estrela tão pesada quanto Sírio. Havia uma saída para este enigma. Esta saída consistia em admitir que a companheira de sírio apesar de muito pequena, era constituída de matéria 3.000 vezes mais densa do que a matéria de estrelas mais vulgares. A resposta para este problema teve de aguardar o aparecimento da teoria quântica, em 1927, e até o trabalho de um indiano de 19 anos, Subramanyan Chandrasekhar (1910-1995) realizado em1930. Partindo dos trabalhos de Ralph H. Fowler (1889-1944), na Inglaterra, que mostrou que uma estrela entra em colapso quando acaba seu combustível nuclear, Chandrasekhar viu aquilo a que conduzia o colapso: uma matéria superdensa, tão densa que 1 cm³ pesaria 600 kg (PEGELS, 1990, p.66).

Fowler usando o princípio de exclusão, descoberto em 1925 pelo físico Wolfgang Pauli (1900-1958), demonstrou que uma força muito superior à força elétrica surge quando tentamos colocar dois elétrons no mesmo estado quântico. Esta força pode ser somente compreendida com base na teoria quântica e não possui análogo na física clássica. É a sua existência a nível atômico que evita o colapso da nuvem de elétrons que rodeiam o núcleo.

Se imaginarmos um gás de elétrons sujeito a uma pressão, a interação repulsiva de troca entre elétrons estabelece uma pressão de Fermi resistente para contrariar esta compressão. Contudo é necessário pressionar o gás fortemente antes que se possa sentir esta pressão de Fermi resistente, que só entra em cena quando os elétrons são empurrados tão perto um dos outros que as suas ondas associadas começam a se sobrepor. Tais condições existem no interior das estrelas. Aquilo que Chandrasekhar compreendeu foi que a pressão de Fermi, nascida do

estranho mundo da teoria quântica, resistiria ao colapso gravitacional e estabilizaria a estrela, desde que a respectiva massa não fosse muito grande. Chandrasekhar calculou que seria este o caso das estrelas com massa inferior a cerca de 1,4 vezes a massa do Sol, passando esta massa crítica a ser conhecida como "limite de Chandrasekhar". Em algumas destas estrelas, a densidade da matéria para a qual se estabelece o equilíbrio entre a gravidade e a pressão de Fermi é de 600 kg/cm3, valor que explicava exatamente o comportamento da companheira de Sírio. Esta estrela, uma Anã Branca, foi outrora uma estrela normal, mas a certa altura o combustível hidrogênio do núcleo esgotou-se, tendo a estrela se estabilizado outra vez graças à pressão de Fermi.



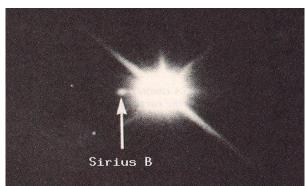


Figura 22: ilustração de uma anã branca.

Figura 23: Sirius B, a companheira de Sírio.

3.5.3 Novas

As Novas são estágios finais de evolução onde ocorrem explosões. Podem ocorrer em sistemas binários onde uma estrela é uma anã branca. O que ocorre é uma captura de massa da estrela companheira pela anã. Espectros de Novas mostram linhas de absorção que são deslocadas para o azul, pelo efeito Doppler da luz. Isto implica que o gás entre a estrela e nós move-se na nossa direção. O material ejetado durante a explosão torna-se transparente e começamos a ver linhas de emissão originadas no gás que está se expandindo. A perda de massa por explosão é de cerca de 10^{-4} da massa do Sol. Esta explosão pode repetir-se muitas vezes e neste caso a Nova é dita "Recorrente".

3.5.4 Supernovas

As supernovas são o resultado da explosão de uma estrela supergigante, como massa inicial superior a 25 vezes a massa do Sol, ou da evolução de sistemas binários. Nessa explosão, os elementos químicos mais pesados do núcleo irão enriquecer o meio interestelar. Durante dias ou semanas após sua explosão, a sua radiação pode ser igual à emitida pelo resto da galáxia. A explosão de uma supernova representa a morte de uma estrela e o espalhamento da maior parte do seu material, enquanto as novas utilizam apenas uma fração da massa estelar. A partir das explosões de supernovas são formados raios cósmicos que são núcleos de átomos que se movimentam a altíssimas velocidades.

Coube a Walter Baade (1893-1960) e Fritz Zwicky (1898-1974) estimarem a energia liberada no fenômeno supernova. Foram eles que sugeriram que estes objetos, bem longe de serem estrelas novas, eram estrelas moribundas que terminavam a sua vida num colapso gravitacional cataclísmico acompanhado de uma gigantesca explosão. Na realidade foi Zwicky quem imaginou que as supernovas provinham de um colapso gravitacional de estrelas massivas. Previu que o resultado desse colapso, após essa explosão, era uma "estrela de nêutrons" (conceito inventado por ele). As supernovas do tipo 1A são usadas pelos astrofísicos na medida do universo e sua expansão (MORAIS, 2009, p.252).

3.5.5 Estrelas de nêutrons

Com o aumento da densidade devido à contração gravitacional, os elétrons podem se aproximar muito dos prótons produzindo uma reação entre estas partículas, ocasionando sua transformação em nêutrons, com liberação de partículas subatômicas denominadas antineutrinos. Os nêutrons assim formados interagem entre si, dando origem a um novo tipo de matéria degenerada cuja pressão é suficiente para estabelecer um novo estado de equilíbrio. Forma-se assim uma estrela de nêutrons. A densidade da matéria que constitui estas estrelas é da ordem de 10¹⁷ a 10¹⁸ kg/m³. As estrelas de nêutrons podem ter apenas algumas dezenas de quilômetros de diâmetro.

Os pulsares, descobertos a partir de 1967, são estrelas de nêutrons em rotação. Esses objetos podem apresentar uma emissão de energia periódica na

direção de um observador, com períodos da ordem de segundos ou décimos e milésimos de segundos, correspondentes à sua rapidíssima rotação, desde que o observador esteja situado numa direção pela qual passe um dos feixes de radiação que ele emite ao longo de seu eixo magnético, enquanto, gira (Fig. 25 e 26). Um pulsar pode ser considerado uma espécie de farol cósmico, emitindo pulsos de energia, com alta frequência, na direção do eventual observador. A grande maioria dos pulsares foi observada na região de radiofrequência. Seu campo magnético é extremamente intenso e seus polos magnéticos podem estar bem afastados de seus polos de rotação. Partículas ionizadas são capturadas por este campo sendo dirigidas para os polos magnéticos da estrela de nêutrons, emitindo radiação ao se chocarem com sua superfície (MOURÃO, 1983, p.205).

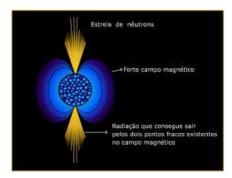


Figura 25: Ilustração de uma estrela de nêutron.

Figura 26: Ilustração de um pulsar

3.5.6 Buracos negros

Buracos negros são formados quando a massa resultante da explosão de uma supernova é superior a 2,4 massas solares. O núcleo passará por um estágio de estrela de nêutrons e continuará se contraindo, pois não há forças capazes de conter a contração de massas dessa grandeza. Uma vez iniciado o processo de colapso a estrela se torna cada vez mais densa e um forte campo gravitacional passa a deslocar a radiação emitida para o vermelho, radiação esta que será encurvada pelo forte campo gravitacional. Quando nenhuma radiação conseguir escapar deste campo gravitacional a estrela retira-se do universo observável, dando origem a um buraco negro.

A fronteira de um buraco negro não é uma superfície material verdadeira, mas simplesmente uma fronteira matemática, que delimita o espaço do qual nenhuma luz

escapa. Esta fronteira é chamada de "horizonte de eventos". Qualquer evento que ocorra no interior desta fronteira nunca pode ser observado fora dela.

Um dos pioneiros no desenvolvimento de uma teoria a respeito dos buracos negros foi o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) que, no inverno de 1915, descobriu uma solução simples, mas exata, das equações de Einstein da relatividade geral, a qual descrevia a curvatura do espaço à volta de massas esfericamente simétricas. Schwarzschild descobriu que, para massa suficientemente compactas existia um raio finito, hoje chamado raio de Schwarzschild, para o horizonte de eventos, no qual as ondas de luz emitidas teriam um comprimento de onda infinitamente grande, o que equivale a dizer que a luz não poderia escapar. (MATSAS, 2008)

Outra descoberta bastante esclarecedora é que um buraco negro circundado por nuvens de matéria pode ser visível, isto é, deixar um sinal de sua existência. Quando uma partícula material cai em um buraco negro, ganha energia e se aquece o suficiente para ionizar os átomos. A gravidade acelera o gás ionizado que emite radiação eletromagnética. Se o gás atingir alguns milhões de graus kelvin pode emitir raios-X. Em 1970, cientistas americanos colocaram em órbita o satélite Uhuru, lançado do Quênia no 7º aniversário de independência daquele país. Uhuru significa liberdade no Swahili, língua nativa local (OLIVEIRA FILHO, 2004, p. 203). A missão desse novo satélite era captar objetos que emitiam raios-X muito intensos. O Uhuru descobriu centenas de novas fontes de raios-X. Em vários casos a fonte era uma estrela de nêutrons compacta extraindo gás de uma estrela companheira. Mas Cygnus X-1 era diferente. Na mesma posição dessa fonte de raios-X há uma estrela azul, quente, imensa com massa aproximadamente 30 vezes a massa do Sol. Ela está girando em torno de um objeto invisível que tem a massa de aproximadamente 10 vezes a massa do Sol, bem acima do limite de uma estrela de nêutrons. Os astrônomos concluíram que o objeto invisível deve ser um buraco negro, o primeiro de muitos que seriam detectados. Cygnus X-1 e sua companheira supergigante começaram a vida como um sistema binário de estrelas. Visto de perto, o par seria um espetáculo impressionante, com um pequeno buraco negro, cujo diâmetro não é superior a 30 km, extraindo gás da estrela que forma um redemoinho, chamado disco de acreção. À medida que o gás cai no buraco negro, sua velocidade aumenta rapidamente, até chegar próxima à velocidade da luz. O atrito torna esse gás

extremamente quente e o disco de acreção adquire um brilho ofuscante. Nas proximidades do buraco, o gás torna-se tão quente que emite raios-X, o que permite a sua visualização nesta banda do espectro eletromagnético.



Figura 27: Ilustração de um Buraco Negro.

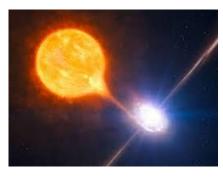


Figura 28 Ilustração de uma massa estelar sendo atraída por um Buraco Negro

4. FERRAMENTAS PARA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS EM ASTRONOMIA

4.1 A unidade astronômica (UA)

As unidades de medida de distâncias mais utilizadas na Ciência são os múltiplos e submúltiplos da unidade padrão do sistema internacional de unidades (SI), o metro, cujo símbolo é "m". Quando esta unidade foi definida pela primeira vez, utilizou-se como referência a distância do equador ao polo norte medida ao longo do meridiano de Paris. Definiu-se então que o metro seria igual a um décimo milionésimo (1/10⁷) dessa distância. Atualmente o metro é definido como o comprimento da trajetória percorrida pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo igual a 1/299.792.458 segundos. Porém o metro não é conveniente quando trabalhamos com distâncias muito grandes.

Historicamente, foi Nicolau Copérnico o primeiro a conseguir determinar uma escala de distâncias para o sistema solar, por meio do seu modelo de universo. A primeira unidade utilizada para medir distâncias para objetos astronômicos foi a atualmente denominada "unidade astronômica" (UA), que corresponde, por definição, à distância média da Terra ao Sol. Com essa unidade, Copérnico conseguiu estimar as distâncias do Sol até Saturno, o último planeta conhecido em sua época, embora não soubesse a sua correspondência em metros, fundamental para se avaliar a dimensão real do sistema solar – sendo este um dos grandes problemas a ser resolvido pelos astrônomos que se seguiram a Copérnico. Atualmente sabe-se que 1 UA, com quatro algarismos significativos, corresponde a 1,496 x 10¹¹ metros.

Segundo a *International Astronomical Union* (IAU), uma unidade astronômica é igual à medida do raio da órbita circular não perturbada de um corpo de massa desprezível em movimento em torno do Sol com uma velocidade sideral (em relação ao fundo de estrelas) de 0,017202098950 radianos por dia. Este valor corresponde à distância média Terra-Sol. A primeira estimativa mais precisa deste valor ocorreu em 1 de outubro de 1672. Para este fim foi observado o planeta Marte que, nesta ocasião, estava próximo a seu perigeu e passando pela constelação do Aquário, por entre estrelas conhecidas, como a Psi² do Aquário (veja fig. 14), que podiam ser utilizadas como referência para a determinação precisa de sua posição. Com as observações simultâneas de Jean Richer (1630-1696) em Caiena na Guiana

Francesa, de Jean Picard (1620-1682) e de Olaus Roemer (1644-1710) em Paris, o astrônomo Giovanni Domenico (1644-1712) estimou a paralaxe de Marte, quando observado destas duas cidades, em 18". Sabendo que Marte está a 1,52 UA do Sol, estimou o valor da UA como sendo 140 milhões de quilômetros. O valor atual é de 149,59787069 milhões de quilômetros (OLIVEIRA FILHO, 2004, p. 138).

4.2 O ano-luz

Quando saímos do sistema solar, a UA passa a ser uma unidade muito pequena, sendo necessário o uso do ano-luz, unidade que corresponde à distância que a luz percorre no vácuo em um ano, se deslocando a cerca de 300.000 km por segundo. O ano-luz equivale à 9,46053 x 10¹⁵ metros. Desse modo, a distância da Terra ao Sol passaa ser cerca de 8 minutos-luz, enquanto a estrela mais próxima, a *Proxima Centauri*, está a aproximadamente 4 anos-luz da Terra. Isto significa que, viajando à velocidade da luz, você levaria 8 minutos para chegar ao Sol e 4 anos para visitar *Proxima Centauri*.

O valor da velocidade da luz foi determinado, pela primeira vez, em 1675, quando o astrônomo dinamarquês Olaus Roemer, já citado anteriormente, encontrou o valor de 241.500 km/s, ao medir os intervalos entre sucessivos eclípses de lo, uma das luas de Júpiter, para diferentes pontos da órbita da Terra.

O próximo aperfeiçoamento importante na medição da velocidade da luz só veio a ocorrer mais de um século depois. Em 1849 o físico francês Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) encontrou 3,133 x 10⁸ m/s. Outros cientistas, incluindo o norte americano Albert A. Michelson (1852-1931), conduziram experimentos importantes durante o final do século XIX e início do século XX. O trabalho de Michelson, inclusive, lhe rendeu o prêmio Nobel de Física de 1907, por utilizar técnicas óticas que produziram medições bem precisas, em torno de 299.910 km/s. Esta medida foi obtida em 1880. Antes dele, o físico francês Foucault (1819-1868) havia aperfeiçoado grandemente o método de Fizeau, encontrando em 1862 o valor de 313.300 Km/s. Em 2006 estabeleceu-se um valor que os físicos passaram a adotar como padrão, pois o próprio metro passou a ser definido em termos da velocidade da luz, conforme mencionamos no primeiro parágrafo do presente capítulo. Segundo

o volume 4 do "Fundamentos de Física" de Halliday-Resnick, 8^a edição, p. 394, este valor é de 2,997 924 58 x 10^8 m/s.

4.3 O parsec:

O "parsec" é definido graças ao método de determinação de distância denominado "triangulação" ou "paralaxe", que já mencionamos anteriormente. Por definição, 1 parsec (pc) é a distância na qual uma unidade astronômica é vista sob o ângulo de 1" de arco, quando observada ao longo de uma direção que lhe é perpendicular (fig. 29). Sendo assim, 1 parsec é igual a cerca de 3,26 anos-luz, ou 206.265 UA, e corresponde, aproximadamente, a 3,09 x 10¹³ km, ou seja, 30,9 trilhões de quilômetros. Se conhecermos a chamada "paralaxe heliocêntrica" (que utiliza o diâmetro da órbita da Terra como linha de base) de um determinado objeto, expressa em segundos de arco, podemos obter a sua distância em parsecs pela expressão:

$$d(pc) = \frac{1}{p(")}$$

Onde "d" é a distância em parsec e "p" é a paralaxe do astro cuja distância queremos medir em segundos de arco.

Observando a figura ao lado, que ilustra a definição do parsec, vemos que, para uma paralaxe de 1" de arco, a distância estrela imaginária até а considerada é de 1 parsec, mas que, se variamos esta distância, também variará a paralaxe heliocêntrica do objeto: quanto maior a distância, menor a paralaxe. Desse modo é possível determinarmos a distância até os astros por triangulação, utilizando o diâmetro da órbita da Terra como linha de base, desde que a medida. paralaxe Porém possa ser sabemos que, para distâncias muito

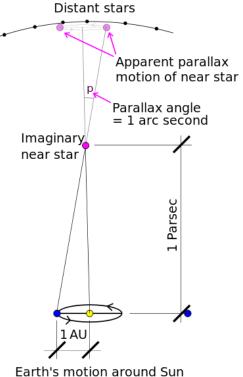


Figura 29: Definição de parsec.

grandes, a paralaxe torna-se tão pequena que inviabiliza o uso deste método.

Até há poucos anos, com os telescópios de solo disponíveis na Terra, a maior distância de estrelas que se podia medir com precisão maior do que 10% era 20 pc, o que corresponde a uma paralaxe ≥ 0,05". Em agosto de 1989 foi lançado o satélite HIPPARCOS (High precision Parallax Collecting Satellite), construído para medir com alta precisão a posição e a paralaxe de 120.000 estrelas. Este satélite operou até agosto de 1993 e deu origem a dois catálogos: o catálogo Hipparcos e o catálogo Tycho, publicados pela Agência Espacial Européia (ESA) em 1997. O catálogo Hipparcos contém a medida da paralaxe de 100.000 estrelas com uma precisão de 0,002 segundos de arco. O catálogo Tycho contém fundamentalmente a posição de 400.000 estrelas. Atualmente, o uso de **CCDs** e telescópios dedicados a este fim, baixou a incerteza das observações na Terra para até 0,001 segundos de arco, similar à incerteza das observações com o satélite Hipparcos (OLIVEIRA FILHO, 2004. p. 141). É interessante notar que 1 milisegundo de arco corresponde, aproximadamente, ao tamanho de uma pessoa na Lua vista da Terra. Uma nova missão da ESA, denominada GAIA (acrônimo de Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), deverá superar em muito este resultado. Essa missão tem o ambicioso objetivo de realizar o maior e mais preciso mapeamento tridimensional da nossa própria Galáxia, a Via Láctea, medindo com precisão a posição de mais de um bilhão de estrelas (ESA, acesso em 12 mar 2014). O lançamento de seu respectivo observatório espacial, equipado com uma câmera CCD com quase 1 bilhão de pixels, capaz de realizar medidas de paralaxe com a precisão de 24 microsegundos de arco – equivalente a medir o diâmetro de um fio de cabelo humano a uma distânciaa de 1.000 km -, foi realizado em 19 de dezembro de 2013. Atualmente esse observatório ainda está em fase de calibragem de instrumentos, mas em breve estará operacional e dará início à sua campanha de observações precisas, com duração prevista de 5 anos, que deverá gerar extraordinários resultados científicos.

4.4 O sistema de magnitudes:

Hiparco foi o inventor do astrolábio e introduziu um sistema de classificação de brilho para as estrelas denominado "sistema de magnitudes", ou "grandezas", estelares. Nesse sistema, Hiparco distribuiu o brilho das estrelas por seis classes de

grandezas estelares, de 1 a 6, de maneira que fossem inversamente proporcionais ao seu brilho. Assim, quanto maior a grandeza de uma estrela, menor o seu brilho. As estrelas de grandeza 6 estariam no limite da visibilidade humana, e hoje seria necessário um local sem poluição luminosa para podermos vê-las e, mesmo assim, dependeria do observador. Devido ao uso de instrumentos óticos que estendeu a visibilidade para objetos muito muito mais tênues, a escala de grandeza é atualmente muito mais vasta, incorporando números negativos, fracionários e maiores que 6. Afinal sabemos que, ao contrário da época de Hiparco, as estrelas não estão presas a nenhuma esfera, mas sim, a distâncias diferentes ou profundidades diferentes no céu, o que dava aos antigos a impressão de que estavam todas a uma mesma distância (MORAES, 2009, p. 166-167).

Foi John Flamsteed (1646-1720) quem primeiro estendeu o conceito de magnitude para as estrelas observáveis apenas com telescópios, introduzindo também algumas modificações nas notações utilizadas. Somente em 1796 foi que Wilhelm Herschel introduziu uma nova concepção no conceito de magnitude, considerando a existência de magnitudes fracionárias. À esta nova concepção de Herschel, seguiram-se várias outras, que levaram os astrônomos a revisar a classificação do brilho das estrelas, dando-lhe um maior fundamento empírico através da utilização de novas técnicas de observação que deram origem à fotometria moderna. Utilizou-se também a lei fisiológica de Gustav Theodor Fechner (1801-1887), segundo a qual quando um estímulo (como a luz proveniente de uma estrela) cresce em progressão geométrica, as sensações produzidas crescem em progressão aritmética.

A magnitude, ou grandeza, é determinada a partir da medida do fluxo de luz proveniente da estrela. O fluxo de luz é a quantidade de energia luminosa que incide sobre uma determinada área, perpendicular à direção de propagação desta luz, por unidade de tempo e de área. Se o fluxo incidir sobre uma superfície coletora, como, p. ex., uma lente ou espelho de um telescópio, poderá ser medido por um fotômetro a ele adaptado. Medida esta grandeza, a magnitude pode ser calculada através da fórmula de Norman Robert Pogson (1829-1831), estabelecida em 1856 a partir da convenção de que uma estrela que possui uma magnitude cinco vezes menor que outra possui fluxo 100 vezes maior (convenção de Pogson), escolhendo-se ainda um

fluxo padrão, ao qual se relaciona o zero da escala de magnitudes, conforme indicado nas equações 4.1 e 4.2.

4.5 Luminosidade das estrelas:

Em Astronomia, a luminosidade de uma estrela é definida como sendo a energia radiante total que ela emite, em todas as direções, por unidade de tempo, ou seja, corresponde à sua potência luminosa, que os astrônomos preferem chamar de "luminosidade".

O fluxo observado (potência por unidade de área) à superfície da Terra é o que denominamos por brilho da estrela ou, com mais rigor, o brilho aparente da estrela. Como sabemos, as estrelas estão a diferentes distâncias de nós. As estrelas povoam todo o espaço. É um efeito de nossa dificuldade de perceber a sua profundidade que nos dá a impressão de que elas estão próximas uma das outras, sobre a superfície de uma mesma casca esférica (a abóbada celeste), como imaginavam os antigos. Devido a este fato foram definidos dois tipos de magnitudes, que a seguir abordaremos.

4.5.1 Magnitude aparente:

Leva em conta apenas a intensidade da radiação (fluxo) que recebemos na Terra proveniente de uma estrela. A constante "C" da equação abaixo que determina a magnitude aparente "m", define o ponto "zero" da escala. Normalmente, utiliza-se a magnitude aparente da estrela Vega, a Alfa da Lira, como m = 0.

$$m = -2.5 \log_{10}(F) + C \tag{4.1}$$

Através da escala introduzida por Pogson, se considerarmos duas estrelas de magnitudes m1 e m2, a relação entre as suas magnitudes e os respectivos fluxos é determinada por:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}(\frac{F_{0m1}}{F_{0m2}})$$
 (4.2)

A equação acima é chamada "equação de Pogson". Ela permite definir uma escala de magnitudes que segue a convenção de Pogson, de que uma estrela que possui uma magnitude cinco vezes menor que outra possui fluxo 100 vezes maior.

4.5.2 Magnitude absoluta:

Designamos por "fotometria" a medida do fluxo, ou intensidade, da radiação proveniente de um objeto. Até ao fim da Idade Média, o instrumento mais importante da observação astronômica era o olho humano. Para este fim, se conceberam vários aparatos mecânicos para medir a posição dos corpos celestes. A Astronomia, como a concebemos hoje, começou a ser feita com a invenção do telescópio, no começo do século XVII, e ganhou força com as observações astronômicas de Galileu.

A fotografia astronômica teve seu início no fim do século XIX. Durante as últimas décadas do século XX, muitos tipos de detectores eletrônicos foram concebidos para estudar a radiação eletromagnética que nos chega do espaço. Todo o espectro eletromagnético, desde a radiação gama até as ondas de rádio, é atualmente usado para observações astronômicas. Apesar de observações com satélites e balões poderem ser feitas fora da atmosfera, a grande maioria das observações é feita na superfície do nosso planeta.

É da radiação eletromagnética que nos chega que podemos obter informações sobre a natureza física de sua fonte. Para isso estudamos a distribuição de energia desta radiação. A intensidade da radiação, ou seja, a sua potência por unidade de área, como já mencionamos, é normalmente denominada de "fluxo", ou "brilho" em Astronomia.

Um resultado extremamente relevante que deve ser considerado é o de que o fluxo de radiação que chega a um detector diminui com o inverso do quadrado da distância "r" entre a fonte e o detector, de forma que o fluxo que chega à Terra é muito menor do que o fluxo na superfície do astro, estando "diluído" por um fator de $1/r^2$, que é imenso, no caso das distâncias astronômicas.

Para uma estrela esférica de raio R, o fluxo observado na superfície será:

$$F(R) = \frac{L}{4\pi R^2} \tag{4.3}$$

Onde F(R) é o fluxo observado na superfície, e L é a luminosidade da estrela. Já o fluxo a uma distância "r" do centro da estrela será:

$$F(r) = \frac{L}{4\pi r^2} \tag{4.4}$$

Substituindo (4.4) na equação (4.1), a grandeza aparente é determinada por:

$$m = -2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{4\pi r^2} \right) + C \tag{4.5}$$

Na relação acima, vemos que a magnitude aparente depende da luminosidade da estrela e da distância até nós, representada por "r".

O brilho de uma estrela também pode ser expresso em termos de sua magnitude absoluta "M" que, por definição, é a magnitude que a estrela teria se estivesse a uma distância padrão d = 10 pc de nós. Desta maneira, se F é o fluxo a 10 pc e F_o o fluxo observado, então:

$$\frac{F}{F_0} = \left(\frac{d}{10}\right)^2 \tag{4.6},$$

sendo d expresso em parsecs.

Assim, sendo "M" a magnitude absoluta, vamos substituir (4.6) em (4.2):

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} \left(\frac{d}{10}\right)^2$$

 $M - m = -5.0 \log_{10} \left(\frac{d}{10}\right)$
 $M - m = -5.0 [\log_{10} d - \log_{10} 10]$
 $M - m = -5.0 [\log_{10} d - 1]$
 $M - m = 5.0 - 5.0 \log_{10} d$ (-1)
 $m - M = -5.0 + 5.0 \log_{10} d$ (4.7)

A equação (4.7) nos diz que o brilho de uma estrela expresso por meio de sua magnitude aparente é função de sua magnitude absoluta e de sua distância. Nesta relação, a distância "d" é expressa em parsecs. A diferença "m – M" é chamada "módulo de distância". Conhecendo-se o espectro de uma estrela, é possível recorrer ao diagrama de Hertzspung-Russell para consultar a sua luminosidade e obter uma estimativa de sua magnitude absoluta. Se, então, medirmos sua magnitude aparente, será possível fazer uma estimativa da distância da estrela até nós aplicando (4.7).

5. ALGUMAS TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS EM ASTRONOMIA

5.1 Introdução:

A medição de distâncias em Astronomia é o primeiro passo para a determinação de vários parâmetros relativos aos objetos astronômicos. A determinação dessas distâncias também foi o que permitiu testar os modelos de Universo concebidos ao longo da história. As técnicas utilizadas para medição de distâncias em Astronomia são, portanto, de enorme importância para o estudo do Universo.

A primeira e mais básica destas técnicas é a denominada "paralaxe" ou "método da triangulação", que já discutimos em associação à definição de parsec. A paralaxe heliocêntrica vai diminuindo à medida que a distância até o astro aumenta. A paralaxe mais elevada pertence a *Proxima Centauri*, a estrela mais próxima de nós, cujo valor é de 0,762" de arco.

Outra técnica muito utilizada de determinação de distâncias é a que usa estimativas de velocidades por meio do efeito Doppler, detectado pelo deslocamento de linhas espectrais na luz emitida pela fonte, e então aplicando a Lei de Hubble:

$$v = H_0 . d$$
 (5.1)

Outra medição de grande importância é a do próprio valor H_0 da chamada "constante de Hubble". Embora este valor tenha a dimensão de inverso do tempo é normalmente medido em $km.s^{-1}$. Mpc^{-1} . Esta constante permite, além de determinar distâncias, estabelecer uma estimativa para a idade do universo.

Para medirmos H_o são fundamentais os objetos conhecidos como "indicadores de distância" como, por exemplo, as variáveis cefeidas e as supernovas. Desde que conheçamos a sua luminosidade absoluta e meçamos o brilho aparente destes objetos, considerandoo que o fluxo diminui com o inverso do quadrado da distância, é possível determinar sua distância, p. ex., aplicando a equação (4.7). Veremos mais tarde que estes objetos formam um padrão para determinar distâncias cosmológicas, daí serem conhecidos também como "velas padrão" de distâncias.

Um fator que dificulta a determinação das distâncias por esse método de comparação entre brilho aparente e absoluto, é a absorção da luz pelo meio interestelar, a qual reduz a intensidade luminosa proveniente do astro e ainda produz um efeito de "avermelhamento" da radição, pois, em geral, os comprimentos de ondas menores (azul) são mais espalhado que os maiores (vermelho) pela poeira existente nas nuvens interestelares. Esses efeitos devem ser levados em conta para melhorar as estimativas de distância por esse método.

O uso de "velas padrões" exige, inicialmente, a calibragem de alguns objetos dentro de nossa galáxia para podermos então comparar distâncias extragalácticas. Estes objetos são denominados indicadores primários de distância. É o caso das variáveis cefeidas, cuja relação período-luminosidade foi descoberta em 1912 por Henrietta Leavitt (1868-1921) e depois foi utilizada por Hubble para determinar a distância até Andrômeda. Chamamos de indicadores secundários os objetos calibrados em galáxias cujas distâncias foram determinadas com indicadores primários. As novas, supernovas e nebulosas planetárias são exemplos de indicadores secundários. A equipe que trabalha com o *Hubble Space Telescope* (HST) desenvolveu um programa que calibra distâncias de cefeidas com o objetivo de aferir a luminosidade de Supernovas do tipo 1A.

5.2 O cálculo da distância pelo método da triangulação ou paralaxe:

No século XVIII quando a idéia heliocêntrica sobre o universo já havia se estabelecido quase que completamente, vários astrônomos tentaram determinar a paralaxe de estrelas, o que possibilitaria comprovar a translação da Terra em torno do Sol e permitiria determinar, por triangulação, a distância entre as estrelas e a Terra. Devido ao movimento da Terra em torno do Sol, uma estrela mais próxima seria vista, ao longo do ano, em posições diferentes em relação às estrelas mais distantes, que serviriam como fundo de referência. A paralaxe heliocêntrica então é definida como sendo o ângulo, com vértice na estrela, dentro do qual se observaria a unidade astronômica de distância (fig. 29). Este ângulo pode ser determinado se observarmos a mesma estrela estando a Terra no periélio e, seis meses depois, no afélio. Assim, a distância angular entre as posições observadas será o dobro da paralaxe que pode ser, então, medida diretamente. Entretanto, até a década de 1830, ninguém havia conseguido medir a paralaxe de nenhuma estrela. Foi possível,

porém, descobrir-se um fenômeno até então desconhecido, que era a aberração da luz das estrelas oriunda do resultado da composição da velocidade da luz com a velocidade de translação da Terra. Finalmente, por volta de 1838, os astrônomos Thomas Henderson (1798-1844), Friedrich Georg Wilhelm Von Struve (1793-1864) e Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) determinaram pela primeira vez a paralaxe heliocêntrica de três estrelas: Alfa Centauri, Vega e 61 Cygni. Puderam assim, usando a triangulação Terra-Sol-estrela, determinar as suas respectivas distâncias. Verificou-se que elas se encontram muito afastadas da Terra. Distâncias estas superiores a 40 trilhões de quilômetros (distância de Alfa Centauri, que se revelou a mais próxima de nós). Contudo as paralaxes das estrelas são muito pequenas, sendo extremamente difícil a sua determinação. Na prática é comum tirar-se um grande número de fotografias, ao longo do ano e por vários anos, determinando-se sua paralaxe com razoável precisão. No entanto a maioria das estrelas não podem ter sua distância determinada por este método. Isto porque o erro associado às medidas de paralaxe vai se tornando muito grande comparado ao valor da própria paralaxe à medida que a distância vai crescendo. Por exemplo, uma estrela cuja paralaxe medida tivesse valor de 0,005", considerando que a incerteza nesta medida feita com os melhores telescópios baseados na Terra é desta mesma ordem, apresentaria uma incerteza da ordem de 100% associada à determinação de sua distância. Por isto, outros métodos existem, baseados em alguns conhecimentos das características físicas das estrelas e outras grandezas a elas relacionadas. Abaixo descrevo o cálculo da distância pelo método da triangulação ou paralaxe (MORAIS, 2009, p. 249-250):

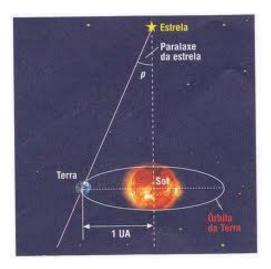


Figura 30: Determinação da paralaxe heliocêntrica.

$$\sin p = \frac{1}{d} \tag{5.2}$$

$$d = \frac{1}{\sin p} \tag{5.3}$$

Sabemos que a paralaxe p é muito pequena, o que possibilita considerarmos $p = \sin p$, logo:

$$d = \frac{1}{p} \tag{5.4}$$

A relação acima nos dá a distância da estrela até nós (em UA) em função da paralaxe p, dada em radianos. Se expressarmos a paralaxe em segundos de arco, será necessário fazer a conversão de segundos de arco para radianos ao aplicar (5.4) (1" \approx 4,848 x 10⁻⁶ rad).

5.3 A constante de Hubble como parâmetro para medição de distâncias:

Quando uma fonte sonora se aproxima ou se afasta de um observador, notamos uma variação na sua frequência. Ao aproximar-se, o som torna-se mais agudo (frequência maior) e, ao afastar-se, o som torna-se mais grave (frequência menor). Este efeito é denominado "Efeito Doppler" e também ocorre com ondas eletromagnéticas, ou seja, com a luz.

Quando observamos o espectro integrado de uma galáxia, o que vemos é o espectro da luz de muitas estrelas. Há um desvio nas suas linhas devido ao movimento próprio das estrelas da galáxia e também devido ao movimento da galáxia com um todo. Este último movimento leva a galáxia em questão a se aproximar ou se afastar de nós, de modo que esperamos ver um desvio sistemático nas linhas devido a este movimento. Isto se verifica, por exemplo, para as galáxias do grupo local, sendo esta velocidade de aproximação ou de afastamento da ordem de uma centena de Km/s. Mas, para as galáxias distantes, Hubble havia descoberto que, em praticamente todos os casos, os comprimentos de onda estão desviados para o vermelho, desvio este que aumenta com a distância. A inclinação da reta que encontramos quando colocamos a distância nas abscissas e a velocidade nas ordenadas do plano cartesiano (fig. 28) é uma constante cosmológica fundamental,

denominada "constante de Hubble" H_0 , indicada na equação (5.1). Nessa equação, percebemos que a dimensão de H_0 é do inverso do tempo.

Após uma série de reparos, admitiu-se para a constante de Hubble o valor proposto por Sandage em 1961: $100~km.\,s^{-1}Mpc^{-1}$, isto é, a velocidade de fuga de uma galáxia cresce 100 km por segundo a cada milhão de parcecs. Resumindo, o efeito Doppler fornece a velocidade de recessão e a equação (5.1), que envolve a constante de Hubble, fornece a distância da galáxia até nós. Desse modo, aplicando este método de determinação de distâncias, podemos dizer, por exemplo, que o aglomerado de Virgem está a 23 milhões de anos-luz e alguns quasares a 9 bilhões de anos-luz do nosso planeta.

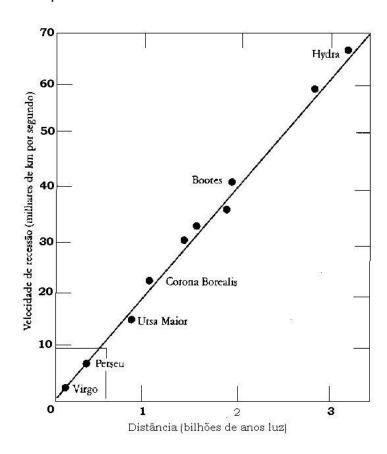


Figura 31: Velocidade de recessão de aglomerados de galáxias em função da distância.

5.4 As supernovas como indicadores de distâncias cosmológicas:

5.4.1 Introdução:

Uma supernova é um acontecimento no espaço-tempo e, como tal, é preciso que o cone de luz desse acontecimento esteja no cone de luz do passado do observador para que seja observável por este observador hoje. A explosão de uma estrela como "supernova" libera tanta energia quanto todas as outras estrelas de sua galáxia. Este evento, no extremo de sua luminosidade, é cerca de 10^{10} vezes mais brilhante que o Sol. Como uma galáxia "pequena" tem em média 10^{11} estrelas, o seu brilho rivaliza com o da própria galáxia onde ocorre o acontecimento "supernova" (MORAIS, 2009, p. 249-250).

Denominamos "remanescente" de uma supernova às nuvens gasosas que podem ser observadas como resultado da ejeção, no meio interestelar, do material da estrela que é expelido na sua explosão. A análise desses "remanescentes" é um bom teste para as teorias de evolução estelar. Segundo essas teorias, estrelas de nêutrons, que podem ser detectadas como pulsares, ou binários de raios X, ou buracos negros, detectados devido à forte emissão de raios X, indicam a existência de um objeto que explodiu como uma supernova.

Coube a Walter Baade (1893-1960) e Fritz Zwicky (1898-1974) estimarem a energia liberada no fenômeno "supernova". Foram eles que sugeriram que estes objetos, bem longe de serem estrelas novas, eram estrelas moribundas que terminaram a sua vida num colapso gravitacional cataclísmico, acompanhado de uma gigantesca explosão. Na realidade, foi Zwicky quem imaginou que as supernovas provinham de um colapso gravitacional de estrelas massivas. Previu que o resultado desse colapso após esta explosão era uma estrela de nêutrons (conceito criado por ele) e que as supernovas desempenhavam um papel crucial na produção de raios cósmicos. A partir de 1934, Zwicky descobriu cerca de 120 supernovas, tornando-se um dos maiores caçadores desses objetos (MORAIS, 2009, p. 252).

As supernovas são catalogadas utilizando as letras "SN" mais o ano da descoberta. No caso de terem sido descobertas mais de uma supernova num mesmo ano, se acrescenta uma letra maiúscula de A a Z. Se o número de supernovas descobertas num dado ano for superior a 26, as seguintes serão

catalogadas com duas letras minúsculas aa, ab, ac,...,zw,zy,zz. Portanto, podem ser catalogadas 702 supernovas por ano. Por exemplo: a supernova SN 1987A, foi a primeira supernova descoberta no ano de 1987

5.4.2 O método:

As supernovas do tipo 1A são as nossas candidatas a régua padrão em Cosmologia, devido ao fato de formarem uma classe bem próxima da homogeneidade em termos de luminosidade. A estrutura das anãs brancas, as suas progenitoras, é bem modelada pelos astrofísicos, de modo que sabemos que as suas curvas de luz são potencializadas pelo decaimento radioativo do Ni^{56} produzido durante a explosão, sendo inclusive a quantidade desse elemento químico que determina seu brilho absoluto.

Com base na observação das supernovas, podemos ter indicações sobre a geometria do universo (aberto ou fechado), a natureza da sua expansão (acelerado ou retardado) e, ainda, medir a constante de Hubble.

Embora sejam muito raras, ocorrendo a uma taxa de uma a cada 400 anos por galáxia, foi desenvolvida uma estratégia de monitoramento, com telescópios, de 100 campos de galáxias, sendo que em cada campo há cerca de 1000 galáxias. O que se faz é subtrair o brilho da galáxia hospedeira e procurar um objeto que fique brilhante na chapa após esta subtração. Conhecendo as suas coordenadas, telescópios maiores e mais potentes apontam nessa direção para confirmar o evento. Após a descoberta da supenova, mede-se seu desvio espectral e o seu brilho aparente. A sua luminosidade absoluta é determinada comparando-se sua curva de luz e espectro com o de supernovas conhecidas, de comportamento semelhante, cuja distância já foi calculada, por exemplo, por meiio da observação de cefeidas presentes na galáxia hospedeira. Desta forma, comparando-se as medidas do brilho aparente e absoluto é possível determinar sua distância de maneira independente da lei de Hubble e até usar o resultado para aprimorar a estimativa do valor de H₀.

Atualmente também se procura utilizar supernovas do tipo II para determinar as distâncias. O método neste caso, é denominado método da fotosfera em expansão que advém do estudo teórico das atmosferas das supernovas deste tipo.

O método consiste em medir o diâmetro angular da atmosfera em expansão da supernova:

Voltando às supernovas do tipo 1A, os estudos destes objetos aplicados à Cosmologia, realizados pelo "Supernova Cosmology Project" do *Lawrence Berkeley National Laboratory* nos EUA e o "The High-Z SN Search", um grupo de várias universidades norte-americanas, parecem indicar que o universo está em expansão acelerada. A confirmação desta hipótese foi laureada com o prêmio Nobel de Física de 2011, já mencionado anteriormente.

Como é que as supernovas podem indicar isto? As distâncias num universo em expansão acelerada são maiores que num universo em expansão desacelerada para objetos de mesmo "redshift". Assim, supernovas distantes parecerão menos luminosas do que se houvesse uma desaceleração, ou expansão constante do Universo. Os dois grupos acima citados, após cuidadosa análise, chegaram à mesma conclusão: estatísticamente as supernovas distantes são menos brilhantes do que se esperava num Universo que estivesse se expandindo a velocidade constante.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O céu noturno é crivado de estrelas cintilantes. Algumas brilham mais porque estão relativamente mais próximas, ou são intrinsecamente muito luminosas. Muitas apenas tremeluzem palidamente, porque estão muito distantes ou são intrinsecamente fracas. Com telescópios e até binóculos, as estrelas dispersas se multiplicam, e vemos miríades que se espalham em todas as direções, por imensas distâncias.

O número total de estrelas que se vê a olho nu, de todos os pontos da superfície da Terra, é de cerca de 6 mil. O número das que podem ser vistas de qualquer ponto e instante específico cai para cerca de 2 mil, menos da metade, porque podemos ver no máximo apenas metade do céu, e também porque não conseguimos avistar as estrelas mais fracas nas proximidades do horizonte. Com binóculos, o número de estrelas observáveis a partir de um ponto aumenta para 50 mil ou mais, e com um telescópio de 5 cm sobe para cerca de 300 mil (HARRISON, 1995, p. 12).

A maioria das estrelas pertence a famílias de dois ou mais membros, que descrevem órbitas em torno uns dos outros. Algumas estão em aglomerados abertos de centenas de estrelas muito jovens, como na Nebulosa do Órion, ou nas Plêiades, e nós as vemos entremeadas de mechas luminosas de gás. Muitas pertencem a aglomerados menos jovens, como Praesepe, na constelação de Câncer. Outras pertencem a vastos aglomerados globulares, que são, cada um, uma densa concentração de centenas de milhares de estrelas velhas, nascidas quando nossa galáxia ainda era muito jovem. Além da nossa galáxia, vemos, espalhadas por uma imensidão de espaço, uma profusão de outras galáxias iluminadas pelas suas estrelas.

Em um universo comprovadamente de tamanho ilimitado, com bilhões de galáxias, cada uma com bilhões de estrelas e planetas, me vem uma pergunta: estamos sozinhos neste imenso mundo? Não seria muita pretensão de nossa parte acreditar que somos os únicos moradores? Um pequeno passo para desvendar este mistério foi dado recentemente.

Em 1977, duas sondas Voyager 1 e 2 foram lançadas com a missão de explorar os quatro planetas gigantes do sistema solar. A idéia era aproveitar um raro

alinhamento de Júpiter, Saturno, Urano e Netuno para realizar um grande "Tour". A Voyager 1 passou por Júpiter em 1979 e Saturno em 1980. A Voyager 2 passou por Urano em 1986 e por Netuno em 1989. As duas funcionam até agora graças à uma fonte nuclear de energia. Os dados enviados por estes artefatos levam 16 horas para chegar à Terra.

No dia 25 de Agosto de 2012 a Voyager 1 tornou-se o primeiro artefato feito pelo homem a navegar pelo espaço interestelar, ou seja, além do sistema solar. Sem depender de painéis solares, a espaçonave ainda tem bateria para nos trasmitir sinais pelo menos até 2020, quando seus instrumentos devem ser desligados e a missão concluida. A Voyager 1 está a 18,7 bilhões de quilômetros da Terra, ou 125 unidades astronômicas (UA). Um disco banhado a ouro com informações sobre o nosso planeta foi colocado na nave. O conteúdo foi escolhido pela equipe do astrônomo Carl Sagan (1934-1996). Na parede da nave há um desenho mostrando a localização do sistema solar em relação a 14 pulsares. Um dos lados do disco é o manual de instrução. As imagens mostram como o disco deve ser tocado com a agulha. Um gráfico ensina a converter parte da gravação analógica do disco em imagens. Nele estão gravados imagens e sons da Terra, como o canto de baleias, um bebê chorando, ondas quebrando numa praia, uma coleção de músicas, de Mozart a Chuck Berry, e saudações em cinquenta diferentes línguas. Eis um belo cartão de visita. Se não estivermos sozinhos, talvez um dia alguém lá fora encontre o nosso endereço.

Não será nesta geração, nem na de nossos netos ou bisnetos, mas um dia este mistério será desvendado. Esperamos que os homens da época saibam usar esta conquista não para destruir mundos, como nos filmes, mas para tornar a vida ainda melhor.

Referências

BARROW, John D. **A Origem do Universo**. Tradução de Talita M. Rodrigues. 2. ed. Rio de Janeiro: Rocco, 1995.

CÂMARA, Airton Lugarinho de Lima. **Introdução à Astronomia do Sistema Solar**. São Paulo: Editora Brasiliense S.A, 1985.

ESA – European Space Agency. Página com informações sobre a missão Gaia. Disponível em: http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia_overview>. Acesso em: 12 mar 2014.

FARIA, Romildo Póvoa (org). **Fundamentos de Astronomia**. 3a. ed. Campinas: Papirus, 1987.

GROUEFF, Stéphane; CARTIER, Jean-Pierre. **O enigma do Cosmo**. Tradução/de/Vera Pedroso-Rio de Janeiro: Primor, 1978.

HARRISON, Edward. A escuridão da Noite: um enigma do universo. Tradução Maria Luiza X. de A. Borges; revisão técnica de Roberto Martins. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed, 1995.

MARAN, Stephen P. **Astronomia para Leigos**. Tradução de Ricardo Samovick-Rio de Janeiro: Alta Books, 2011.

MATSAS, George; VANZELLA, Daniel. **Buracos Negros: rompendo os limites da ficção**. Rio de Janeiro: Vieira e Lent, 2008.

MATSUURA, Oscar T. **Cometas: do mito à ciência**. São Paulo: Ícone Editor Ltda, 1985.

MORAIS, Antônio Manuel Alves. **Gravitação e Cosmologia: uma introdução**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009a.

MORAIS, Antônio Manoel Alves. **Supernovas e Cosmologia**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009b.

MOURÃO, Ronaldo Rogério de Freitas. **O Universo Estacionário**. Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves Editora S/A, 1983.

NOBELPRIZE.ORG. **The 2011 Nobel Prize in Physics** - Press Release, 04 out 2011. Disponível em:

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/press.htm>. Acesso em: 23 fev 2012.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; OLIVEIRA, Maria de Fátima Saraiva. **Astronomia e Astrofísica**. 2a. ed. São Paulo: Editora Livraria de Física, 2004.

PAGELS, Heinz R. **Simetria Perfeita**. Tradução de Henrique Leitão e Paulo Ivo Teixeira-Lisboa: Gradiva-Publicações Ltda, 1990.

ROONEY, Anne. A História da Física. São Paulo: M. Books do Brasil Editora Ltda, 2013.

SEIFE, Charles. **Alfa e Ômega: a busca pelo início e o fim do universo**. Tradução de Talita M. Rodrigues-Rio de Janeiro: Rocco, 2007.

VERDET, Jean-Pierre. **Uma história da Astronomia**. Tradução de Fernando Py-Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1991.

Créditos das Figuras

Figura 1:

Fonte:https://www.google.com.br/search?q=merkhet&newwindow=1&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=drAgU5qkEITykQfHioGwAg&ved=0CC0QsAQ&biw=1188&bih=559. Acesso em: 12 mar.2014.

Figura2:

Fonte:<a href="https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=gnomon&oq=gnomon&gs_l=img.1.0.0l7j0i24l3.488302.491198.0.497439.6.6.0.0.0.0.443.1659.0j1j3j1j1.6.0....0...1c.1.3 7.img..1.5.1320.3nUNzNcdizc>. Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura3:

Fonte:. Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura4:

Fonte:. Acesso em: 12 mar. 2014

Figura 5:

Fonte:<https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=distancia+da+terra+a+lua+por+aristarco+de+samos&oq=distancia+da+terra+a+lua+por+aristarco+de+samos&gs_l=img.12...414024.430606.0.432886.49.42.1.6.7.1.479.8761.5j5j29j1j2.42.0....0...1c.1.37.img..29.20.2954.z9hBLM6-Sj4 >. Acesso em: 12 mar. 2014

Figura 6:

 $Fonte: \langle https://www.google.com.br/search?newwindow=1\&biw=1188\&bih=559\&tbm=isch\&sa=1\&q=distancia+da+terra+ao+sol+por+aristarco+de+samos\&og=distancia+da+terra+ao+sol+por+aristarco+de+samos&gs=l=img.12...329727.339367.0.342451.9.9.0.0.0.0.614.2261.0j4j4j5-1.9.0...0...1c.1.37.img..9.0.0.QoFYijZHE18 >. Acesso em: 12 mar. 2014.$

Figura 7:

Fonte:. Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura 8:

Fonte:https://www.google.com.br/search?q=astrol%C3%A1bio&newwindow=1&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=7xchU4vqEliqkQfP7oDABg&ved=0CC0QsAQ&biw=1188&bih=559>. Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura 9:

 $Fonte: < \frac{\text{https://www.google.com.br/search?newwindow=1\&biw=1188\&bih=559\&tbm=isch\&sa=1\&q=quadrante\&oq=quadrante&gs_l=img.12..0l10.106927.109333.0.113920.9.8.0.1.1.0.246.1119.3j2j3.8.0....0...1c.1.37.img..6.3.140.qRwyRkiLKk8}{\text{Acesso em: 12 mar. 2014.}}$

Figura 10:

Fonte:. Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura 11:

Fonte:<a href="mailto:https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=modelo+heliocentrico@go_emodelo+heliocentrico@

Figura12:

Figura 13:

Fonte:https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=telesc%C3%B3pio+de +galileu&oq=telescopio+de+galileu&gs_l=img.1.0.0.104138.112271.0.114150.21.19.0.2.2.0.474.4205.3j6j6j2j2.19.0....0...1c. 1.37.img..3.18.3368.JXnhKNg1a2k >. Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura 14:

Fonte:g..15.4.681.1l6jf6vVKsY Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura 15: Fonte:http://www.nasa.gov/content/hubble-sees-anemic-spiral-ngc-4921/#.UpPul7uYbGc>. Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura16:

Figura 17: Fonte: < http://senhoresdafisica.blogspot.com/2012/09/evolução_estelar.html>: Acesso em: 12 mar. 2014.

Figura 18:

Fonte:https://www.google.com.br/search?q=regioes+do+sol&newwindow=1&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=jx<a href="https://www.google.com.br/search?q=regioes+do+sol&newwindow=1&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=jx<a href="https://www.google.com.br/search?q=regioes+do+sol&newwindow=1&tbm=isch&tb

Figura 19:

Fonte:hertzsprung&gs |=img.1.0.0i24.532703.549212.0.557745.20.9.0.11.11.0.344.2125.0j2j6j1.9.0....0...1 c.1.37.img..1.19.1986.p4zgfUluWsy>. Acesso em: 12 de mar. 2014.

Figura 20:

Fonte:https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=ciclo+de+vida+das+estrelas&gs l=img.1.0.0.96124.103845.0.107326.26.15.0.11.11.0.212.2357.3j10j2.15.0....0... https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=ciclo+de+vida+das+estrelas&gs">https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1&b

Figura 21:

Fonte:<https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=nebulosa+planet%C3
%A1ria&oq=nebulosa+planet%C3%A1ria&gs_l=img.1.0.0l2.108034.116457.0.118738.19.8.0.11.11.0.496.2191.0j1j5j0j2.8.0...
..0...1c.1.37.img..1.18.1852.6eIRRc2_sOM>. Acesso em: 13 mar. 2014.

Figura 22:

 $\label{lem:https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188\&bih=559\&tbm=isch\&sa=1\&q=ana+branca+estrela\&oq=ana+branca&gs_l=img.1.0.0.143943.149706.0.152292.10.10.0.0.0.0.251.1993.1j3j6.10.0....0...1c.1.37.img..1.9.1784.qQJ_Jkl7Z2E8>. Acesso em: 13 mar. 2014.$

Figura 23:

Fonte:. Acesso em 13 mar. 2014.

Figura 24:

Figura 25:

Fonte:https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=pulsar&oq=pulsar&gs __l=img.1.0.0l10.124516.126872.0.130780.6.6.0.0.0.0.900.1941.0j1j4j6-1.6.0....0...1c.1.37.img..0.6.1938.vF3UhbQDbPQ>. Acesso em: 13 mar. 2014.

Figura 26:

Fonte:<https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=buraco+negro&oq=buraco+negro&gs l=img.12...95633.101128.0.103811.12.12.0.0.0.0.256.2188.1j7j4.12.0....0...1c.1.37.img..10.2.270.6nboeuKpEFQ>. Acesso em: 13 mar. 2014.

Figura27:

Fonte:. Acesso em: 13 mar. 2014.

Figura 28:

Fonte:<https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=determina%C3%A7%C3%A3o+do+parsec&oq=determina%C3%A7%C3%A3o+do+parsec&gs l=img.12...194790.203571.0.205912.22.18.0.4.4.0.446.3822.2j4j10j1j1.18.0....0...1c.1.37.img..6.16.2663.Yg8rztpTNkQ>. Acesso em 13 mar. 2014.

Figura29:

https://www.google.com.br/search?q=determina%C3%A7%C3%A3o+da+paralaxe+estelar&newwindow=1&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=1lwmU-RayYaRB4rggVg&ved=0CEgQsAQ&biw=1188&bih=559

Figura 30:

Fonte:https://www.google.com.br/search?newwindow=1&biw=1188&bih=559&tbm=isch&sa=1&q=diagrama+de+hubble &oq=diagrama+de+hubble&gs l=img.1.0.0i24.211765.217882.0.220340.18.11.0.7.7.1.274.1851.2j3j6.11.0....0...1c.1.37.img ..3.15.1377.MS0OR9v P7g>. Acesso em: 13 mar. 2014.