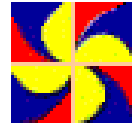




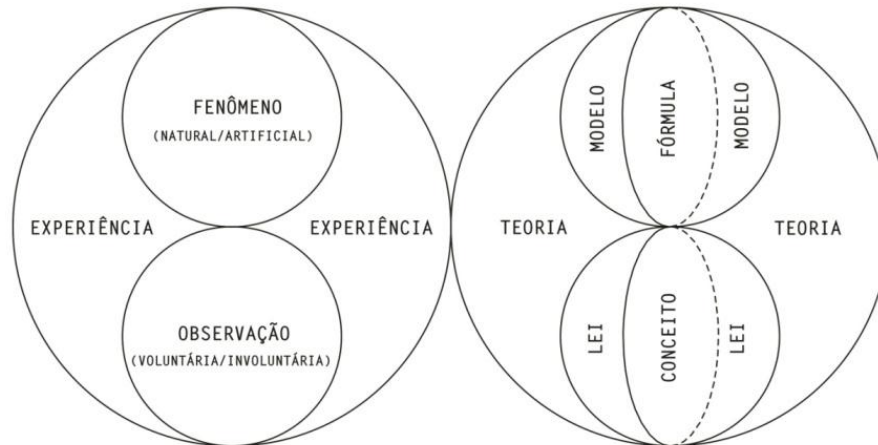
CURIOSIDADES DA FÍSICA
José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br



CADEIA DE COGNIÇÃO DA FÍSICA DO MACROMUNDO

Neste artigo tentaremos mostrar como se desenvolve o conhecimento da Física e, para isso, utilizaremos uma **Cadeia de Cognição** (CC), pois, segundo o físico russo Leonid Ivanovich Ponomarev (n.1937) [**In Quest of the Quantum** (Mir Publishers, 1973)], ela é a base de todo aquele conhecimento. São conhecidos vários aspectos da CC como, por exemplo, os apresentados pelos físicos e filósofos da ciência, dentre os quais, destacamos: 1) o argentino Mario Augusto Bunge (n.1919) [**Foundations of Physics** (Springer-Verlag, NY, 1967); **Philosophy of Physics** (D. Reidel Publishing and Company; Edições **70**, 1973); **Teoria e Realidade** (Editora Perspectiva/Debates, 1974)]; 2) o austríaco Paul Karl Feyerabend (1924-1994) [**Contra o Método** (Editora Francisco Alves, 1975); **Diálogos Sobre o Conhecimento** (Perspectiva, 2001); **Adeus à Razão** (EdUNESP, 2001)]; 3) o húngaro Imre Lakatos (1922-1974) [**A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento Científico** (Cultrix/EdUSP, 1979)]; 4) o franco-brasileiro Pierre Henri Lucie (1917-1985) [**A Gênese do Método Científico** (Editora Campus, 1977)]; 5) o nipo-brasileiro Jun'ichi Osada [**A Evolução das Ideias da Física** (Editora Edgard Blücher/EdUSP, 1972)]; 6) o brasileiro Antonio S. T. Pires [**Evolução das Ideias da Física** (Editora Livraria da Física, 2008)]; e 7) o português José Tito Mendonça (n.1945) [**Uma Biografia da Luz** (Livraria da Física, 2015)].

CADEIA DE COGNIÇÃO DA FÍSICA



Segundo os físicos brasileiros Mauro Sérgio Dorsa Cattani (n.1942) e Normando Celso Fernandes (1936-2014) (*Informação Particular*, 1975), o estudo da Física é feito por intermédio de um encadeamento em que se misturam fatos novos com os já conhecidos e leis novas com as já estabelecidas. Nesse encadeamento, velhas leis são utilizadas na descrição de fatos novos ou mesmo na ampliação dos já estudados. Quando as leis conhecidas são insuficientes para a descrição de novos fenômenos físicos, novas leis deverão ser formuladas. É claro que deveremos constantemente criticar, tanto os elos quanto à própria CC, seguindo os trabalhos dos físicos e filósofos da ciência (cada um a sua maneira), como veremos no decorrer deste artigo.

Inicialmente, diremos que o tangenciamento mútuo (correlacionamento) entre os círculos que compõem a CC representa a influência recíproca entre os juízos indicados em cada círculo, na concepção de que não existe um sentido preferencial para passarmos de um círculo a outro, ou seja, de que não existe uma relação de causalidade entre eles.

O contato entre o círculo da **teoria** e o da **experiência** possui um sentido mais amplo do que o referido antes, pois, além de indicar que toda **teoria** [**modelo teórico**, para Bunge (op. cit.) ou **programa de pesquisa**, para Lakatos (op. cit.)] deverá ser testada experimentalmente e que nenhuma **experiência** pode ser planejada e interpretada sem o recurso da **teoria** [Bunge (op. cit.)]. Tal contacto indica ainda a existência de uma **relação de complementaridade** (RC) entre os círculos, pois que o conhecimento de um só se completa com o conhecimento do outro. Aliás,

essa RC deve ser aplicada a todos os círculos da CC. Em suma, como afirma Feyrerabend (op. cit.), o aprendizado da Física não se desenvolve da **experiência** para a **teoria**, e nem desta para a primeira, mas sempre envolve as duas, ou seja: sempre existe um correlacionamento entre elas.

Antes de detalharmos o conteúdo de cada círculo, cremos ser oportuno fazer um comentário. Há cerca de 2,5 milhões de anos, os hominídeos começaram a evoluir transformando-se no HOMEM atual [Leakey, R. E. e Lewin, R. **Origens** (Edições Melhoramentos/EdUnB, 1981)]. As observações iniciais, tanto no Céu, quanto na Terra, realizada pelo HOMEM, não fazia a distinção entre a **qualidade** e a **quantidade** do que observava. Essa distinção começou a ser realizada quando o HOMEM começou a desenvolver as **invenções** [Sedgwick, W. T., Tyler, H. W. e Bigelow, R. P. **A História da Ciência** (Editora Globo, 1950); de Bono, E. **Eureka! Uma História das Invenções** (Editorial Labor do Brasil S.A., 1975); Solla Price, D. de, **A Ciência desde a Babilônia** (Editora Itatiaia Ltd./EdUSP, 1976); Bronowski, J. **A Escalada do Homem** (Martins Fontes/EdUnB, 1976); Ronan, C. A. **História Ilustrada da Ciência I, II, III** (Jorge Zahar Editor, 1987); Philbin, T. **As 100 Maiores Invenções da História** (DIFEL, 2006); Challoner, J. (Editor). **1001 Invenções que Mudaram o Mundo** (Sextante, 2010)] (basicamente: **dispositivos** decorrentes da extensão dos sentidos, e **modelos**, oriundos do pensamento) e, com isso, a **qualidade** deu origem (*grosso modo* e em nosso entendimento), ao círculo da **experiência** e, a **quantidade**, ao da **teoria**. Porém, na medida em que o conhecimento da Física foi evoluindo, as **descobertas** e as **invenções** foram se correlacionando, de modo que elas passam de um círculo para outro, ou mesmo, ambas existindo no mesmo círculo. Essa correlação é o objetivo central deste texto. Vejamos se conseguiremos realizá-lo.

Assim, iniciemos os detalhamentos do conteúdo de cada círculo. O da **experiência** que, como mostra a figura, contém dois outros círculos: **observação** e **fenômeno**. Segundo nos fala o filósofo austríaco Sir Karl Raymund Popper (1902-1994) [**O Conhecimento Objetivo** (Editora Itatiaia/EdUSP, 1975)], a **observação** (O) pode ser: **voluntária** (OV) e **involuntária** (OI). A OV ocorre quando o **observador** analisa certo **fenômeno** (*natural* e/ou *artificial*) dentro de seu **horizonte de expectativas** (HE) que se constitui na soma total de suas expectativas conscientes ou sub(in)conscientes. Por exemplo, nas experiências diárias realizadas em laboratórios de pesquisas ou mesmo didáticos (hoje, muitas destas são realizadas usando computadores e os aplicativos computacionais, disponíveis na INTERNET) vários resultados são reproduzidos constantemente ou novos resultados esperados são

conseguidos. Por outro lado, a OV poderá não corresponder ao HE de quem a observa, o que ocorrerá quando um resultado novo não esperado for conseguido e, neste caso, diremos que houve uma OI, também conhecida como **descoberta acidental** ou **serendipidade**. Registre-se que este nome deriva de uma estória que é contada em versões diferentes de acordo com o narrador. Neste artigo, usaremos a versão do patologista australiano William Ian Beardmore Beveridge (1908-2006) [**Sementes da Descoberta Científica** (T. A. Queiroz Editor/EdUSP, 1981)]. Segundo esse autor, a palavra **serendipidade** (“serendipity”) foi inventada pelo escritor inglês Horace Walpole (Conde de Orford) (1717-1797), em 28 de janeiro de 1754, em carta que escreveu a um amigo, para representar as descobertas **acidentais**. Para tal, ele se baseou em um conto persa de fadas: - *A Princesa de Serendip, antigo nome do Ceilão (hoje: Sri Lanka), tinha três príncipes pretendentes e a cada um incumbiu uma tarefa impossível: fracassaram todos os três, mas, no decorrer de seus heroicos esforços, cada qual, no entanto, fez descobertas afortunadas e inesperadas, por mero acidente.*

Por sua vez, o círculo da **teoria** é composto de dois outros círculos: **lei** e **modelo**, caracterizados, respectivamente por **conceito** e **fórmula**. Não tentaremos definir estes dois termos, pois eles envolvem uma longa discussão físico-filosófica. Apenas vamos apresentá-los por intermédio de exemplos físicos. Muito embora a **fórmula** possa ser representada por intermédio de uma expressão matemática, o **conceito** é muito mais complexo, já que ele evolui com o tempo, mas, não obstante essa evolução poderemos usar para o mesmo a classificação de Bunge (op. cit.) que diz que o **conceito** pode ser **formal** (decorrente do círculo da **teoria**) e **factual** (decorrente do círculo da **experiência**). Para compor este texto, usaremos exemplos físicos envolvendo o **Macromundo**, sendo este descrito por **Modelos Planetários**.

1. MODELOS PLANETÁRIOS

1. 1. Os Primeiros Modelos Teóricos dos Movimentos dos Astros no Céu das Estrelas Fixas

Certamente os astros nos céus foram objeto de **observações** (OI e OV) por parte dos primeiros seres vivos de nossa Terra. Os conhecimentos sobre a Astronomia pré-histórica são muito escassos e seus primeiros registros aconteceram cerca de 50.000 anos antes de Cristo (a.C.), quando os “arqueoastrônomos” aprenderam a gravar os registros

de suas **observações** por intermédio de pinturas rupestres (realizadas nas cavernas), em esculturas, em túmulos e em outras construções megalíticas (realizadas em rochas). Essas **observações** foram completadas com a **invenção** da **escrita**, o que aconteceu cerca de 25.000 anos (a.C.), no Paleolítico Superior [Sagan, C. (Francisco Alves, 1982); Alarsa, F., Faria, R. P., Pimenta, A. P., Matino, L. A. A., Oliveira, R. S. e Cardoso, W. T. 1982. **Fundamentos de Astronomia** (Papirus, 1982); Évora, F. R. R. **A Revolução Copernicana-Galileana I, II** (EdUNICAMP, 1988); Koestler, A. **O Homem e o Universo** (IBRASA, 1989); Martins. R. A. **Universo: Teorias Sobre a sua Evolução** (Editora Moderna; 1994); Bassalo, J. M. F. **Nascimentos da Física: 3.500 a.C.-1900 a.D.** (EdUFPA, 1996); Gleiser, M. **A Dança do Universo: Dos Mitos de Criação ao Big-Bang** (Companhia das Letras, 1997); Cherman, A. e Mendonça, B. R. **Por Que as Coisas Caem?. Uma História a Gravidade** (Zahar, 2009); Moura, O. J. C. de. **A Medida do Tempo e sua Evolução**, *IN*: Francisco Caruso (Editor), **Diálogos Sobre o Tempo** (Maluhy e Co./Fundação Minerva/Academia Paraense de Ciências, 2010)].

As primeiras **observações** sistemáticas (OV) dos **fenômenos naturais** celestes aconteceram pela necessidade de o HOMEM entender o dia, a noite e as estações, decorrentes do movimento (aparente) do Sol em torno da Terra. Assim, eles desenvolveram o que hoje se conhece como **Horologia** (do grego: *hora* – tempo; *logos* – contar) e, para isso, tiveram de **inventar** o **relógio**. Naturalmente, o primeiro **relógio** foi o próprio Sol, uma vez que ele se “levanta” e se “deita” com certa regularidade. Assim, o homem primitivo trabalhava com a luz do Sol e parava de trabalhar com o escurecer. Os egípcios, por exemplo, dividiam o dia em 24 horas, sendo que a metade, isto é, 12 horas, era invariavelmente contada do nascer ao por do Sol, independentemente da variação da luz solar, durante os diferentes dias do ano e que é devida às estações. Ora, como essa contagem era extremamente imprecisa, por volta de 3.500 anos a.C., no Egito e, principalmente, na Babilônia e em Nínive, duas cidades situadas na Mesopotâmia (região situada entre os rios Tigres e Eufrates, no Oriente Médio, e hoje uma parte do Iraque), apareceram pessoas que começaram a estudar de modo mais detalhado o movimento do Sol e, em consequência, construíram os primeiros **relógios de Sol** – **Gnômons** – constituídos, basicamente, de uma haste (*gnômon*, em grego) fincada na vertical, em pedra ou madeira. Assim, de acordo com o comprimento da sombra desta haste, se tinha uma ideia do tempo. Por volta de 3.000 anos a.C., os egípcios estabeleceram o **ano solar** de 365 dias. Por essa mesma época, os chineses descobriram o **Saros**: intervalo

de 18 anos, 11 dias e 08 horas (em notação atual), após o qual a Terra, Sol e Lua retornam, aproximadamente, às mesmas posições relativas. Nesse intervalo, ocorreram em torno de 43 eclipses solares e 28 lunares, segundo (OI e OV) realizadas por eles.

Por outro lado, para realizar as primeiras explicações teóricas dos movimentos dos astros pelos povos antigos, foi necessário desenvolver uma espécie de “Geometria Social e Prática”, que surgiu da necessidade dos povos antigos em lidar com números e relacioná-los aos problemas que tivessem alguma utilidade. Um dos mais antigos exemplos desse utilitarismo foi a preparação de uma Tabela (**Plimpton 322**), feita pelos babilônios, no período 1900-1600 a.C., e que, somente na Idade Média a mesma foi interpretada como representando o quadrado da **secante** de um arco A ($\sec^2 A$). É oportuno registrar que os babilônios, bem como os egípcios, não conheciam a medida moderna de um ângulo e, muito menos, o conceito de **secante**. Eles, no entanto, desenvolveram modos de medir os lados de um triângulo, ou seja, a “trilaterometria”. Por sua vez, foi na Grécia Antiga que se iniciou um estudo sistemático da relação entre ângulos (arcos) em um círculo e o comprimento das cordas que os subentendia.

Agora, vejamos como aconteceram as primeiras explicações sobre os astros e seus movimentos no céu estelar. Para o filósofo grego Tales de Mileto (624-546 a.C.), a Terra era plana e, por sua vez, flutuava na **água** que, para ele, era a substância primordial do Universo. Já o filósofo grego Anaximandro de Mileto (c.610-c.545 a.C.) concebeu os planetas como sendo **rodas de fogo** girando em torno da Terra, esta considerada como um cilindro que repousava sobre um eixo orientado no sentido leste-oeste e cuja altura correspondia a $1/3$ de seu diâmetro. Por sua vez, o filósofo e matemático grego Pitágoras de Samos (c.560-c.480 a.C.) admitiu a esfericidade da Terra, assim como parece haver sido o primeiro a reconhecer que a estrela matutina (**Dalva**) e a vespertina (**Vésper** ou **Hésper**) era Vênus. Observou ainda que o Sol, a Lua e os planetas não possuíam o mesmo movimento uniforme das estrelas, e que a órbita da Lua não se situava no plano do equador celeste. Como ele havia descoberto a relação harmoniosa entre os comprimentos das cordas dos instrumentos musicais e as tensões nelas aplicadas, relação essa que produziam combinações harmônicas de sons: $2/1$ (**oitava**); $3/2$ (**quinta**), e $4/3$ (**quarta**), Pitágoras afirmou então que as distâncias dos planetas ao nosso planeta (Terra) devem ser harmoniosas, isto é, devem estar na mesma razão que os comprimentos das cordas (sob tensões iguais) que produzem as sete (7) notas básicas da Lira, que era o instrumento musical

nacional na Grécia. O discípulo de Anaximandro, o filósofo grego Anaxímenes de Mileto (c.570-c.500 a.C.) deu outra concepção ao movimento dos astros celestes nos céus: ele os considerou como corpos fixos a **esferas de revolução**, bem como acreditava que o Sol era um corpo plano e parece haver feito, pela primeira vez, a distinção entre **planeta** (sem luz própria) e **estrela** (com luz própria).

As tentativas de formulações de **modelos planetários** (usando a RC entre os círculos da **Teoria** e da **Experiência** de nossa CC) continuaram. Com efeito, o filósofo grego Philolaus de Tarento (ou Crotona) (f.c. 480 a.C.) acreditava na existência de um **fogo central** que representava o centro de um Universo esférico. Esse **fogo de Hestia** (Hestia era a Deusa sagrada, nas casas e nos edifícios públicos) era invisível, pois estava sempre encoberto pelo Sol. Além do mais, ele era envolvido por dez (10) esferas concêntricas representando, respectivamente: Terra, Sol (So), Lua (L), Mercúrio (Me), Vênus (V), Marte (Ma), Júpiter (J), Saturno (Sa), anti-Terra (**antichthon** – planeta sempre oculto para os terráqueos e situado do outro lado do Sol) e **estrelas fixas** (EF). Para Philolaus, o Sol (visível) era um reflexo do fogo central (invisível), e cada uma dessas esferas girava do oeste para leste, completando uma revolução no período correspondente ao do astro que a mesma representava. Por sua vez, esse **Modelo de Philolaus** foi modificado pelos também filósofos gregos: Hicetas de Siracusa (f.c. Século 5 a.C.) postulou um movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo; e Ecphantus de Siracusa (f.c. 399 a.C.) que substituiu o **fogo central** pela Terra.

O filósofo grego Platão de Atenas (c.427-c.347) em seus famosos diálogos (**Timaeus**, **Phaedo**, **Politeia** e **Epinomis**) considerava a Terra imóvel e envolvida por quatro capas esféricas. A primeira, de espessura igual a dois (2) raios terrestres (RT), era composta do elemento **água**; a segunda era composta do elemento **ar**, com a espessura de cinco (5) RT, e constituindo a atmosfera. Em seguida, há uma camada do elemento **fogo** de dez (10) RT, tendo em sua parte superior uma quarta capa esférica na qual se encontravam as estrelas. Os sete (7) planetas então conhecidos (L, So, Me, V, Ma, J e Sa) evoluíam entre a atmosfera e as EF.

O astrônomo e matemático grego Eudoxo de Cnido (c.408-c.355), discípulo de Platão, formulou um **modelo planetário** segundo o qual, basicamente, o movimento dos astros no Universo era consequência de um conjunto de 27 esferas homocêntricas à Terra, seguindo o esquema: 4 para cada um dos planetas (Me, V, Ma, J e Sa), 3 para o So, 3 para a L, e uma (1) para as EF. Estas **esferas fixas** eram assim distribuídas:

o planeta se encontra fixo no equador de uma esfera que gira em torno da Terra. Por sua vez, os polos dessa esfera são deslocados por uma segunda esfera que gira em torno de um eixo normal ao plano da eclíptica (trajetória aparente do So entre as EF). Uma terceira esfera, exterior as duas estrelas antecedentes, dá o movimento do planeta em relação ao céu das EF. Por fim, uma quarta esfera era necessária (para o caso dos planetas Me, V, Ma, J e Sa) para explicar o seu **movimento retrógrado**, isto é, o movimento no qual o planeta, no céu das **estrelas fixas**, se move em um determinado sentido até um “ponto estacionário”; depois, volta no sentido oposto até outro “ponto estacionário”, retomando então ao primeiro sentido, e assim por diante, formando laços (“cúspides”). É oportuno registrar que Eudoxo inventou a curva **hipópode** (resultante da interseção de uma esfera com um cilindro) com o objetivo de explicar esse seu **modelo planetário**. Por sua vez, o astrônomo Calipo de Cízico (c.370-c.300), aluno de Eudoxo, aperfeiçoou o modelo de seu mestre, adicionando mais oito (8) esferas, com o objetivo de explicar os complicados movimentos de Mercúrio e de Vênus, já que eles apresentavam um afastamento limitado em relação ao Sol, respectivamente: $\sim 24^{\circ}$ e $\sim 48^{\circ}$. Registre-se que, em 365 a.C., o astrônomo chinês Gan De parece haver observado um satélite (mais tarde identificado como Ganimedes) de Júpiter.

O **Modelo de Eudoxo-Calipo** foi aperfeiçoado pelo filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322) ao acrescentar mais esferas homocêntricas, perfazendo um total de 55. Essas novas esferas, contudo, destinavam-se a impedir que o movimento de um dado planeta se transmitisse ao seu vizinho, já que, ao que parece, o estagirita considerava as esferas homocêntricas como sendo reais, ao contrário de Eudoxo e Calipo que as consideravam apenas como auxiliares em seus cálculos. Além disso, numa primeira tentativa de explicar a razão dos movimentos celestes, Aristóteles admitiu que depois das **estrelas fixas** existisse o **Primum Móbile** (“Primeiro Móvel”) acionado por **DEUS**, o motor primordial e imóvel, e que além dele não havia nem movimento, nem tempo e nem lugar. Registre-se que Aristóteles apresentou esse seu **modelo planetário** no Livro II de seu tratado **De Caelo** (“Dos Céus”).

Como o **Modelo de Eudoxo-Calipo-Aristóteles** não foi capaz de explicar o comportamento dos planetas Mercúrio e Vênus, o astrônomo grego Heraclides de Pontus (c.388-c.310) formulou um **modelo geo-heliocêntrico** segundo o qual esses dois planetas giravam em torno do Sol e, este, juntamente com os demais planetas (incluindo a Lua), giravam em torno de uma Terra também girante, porém em torno de seu eixo, de

oeste para lente, e diariamente. Registre-se que a ideia de considerar a Terra girante foi utilizada por Heraclides para explicar o movimento diário da esfera (“céu”) das estrelas fixas. Contudo, esse modelo não conseguia explicar o **movimento retrógrado** dos planetas.

Assim, para explicar esse movimento, o matemático grego Apolônio de Perga (c.261-c.190) usou o **sistema epiciclo-deferente**, sistema em que o centro de um círculo menor (**epiciclo**) se desloca ao longo de um círculo maior (**deferente**). Desse modo, o **epiciclo** representa o movimento circular do planeta e o **deferente** é um círculo em cujo centro situa-se o astro em torno do qual orbita o planeta. Para poder explicar os movimentos de Mercúrio e Vênus próximos do Sol, Apolônio tomou o **Modelo Geo-heliocêntrico de Heraclides**, porém com uma nova hipótese: os planetas giram em torno do Sol, e este, gira em torno da Terra. É interessante salientar que Apolônio se tornou célebre por haver escrito um tratado de oito volumes sobre as secções cônicas: elipse, parábola e hipérbole. Tais secções são obtidas ao cortar um cone com determinados ângulos: **elipse**, se o corte for inclinado ao eixo; **parábola** se for paralelo à geratriz; e **hipérbole**, se for paralelo ao eixo. Como Apolônio era particularmente interessado nos movimentos da Lua, os antigos gregos, principalmente, os alexandrinos, o chamavam de **épsilon** (ϵ), pois a forma dessa letra grega é semelhante ao crescente da Lua.

Por volta de 290 a.C., o astrônomo grego Aristarco de Samos (c.320-c.250) formulou pela primeira vez o **modelo heliocêntrico**, isto é, que os planetas (inclusive a Terra) giravam em torno do Sol. No entanto, para defender seu modelo, teve de fazer duas hipóteses. A primeira delas era no sentido de justificar a razão de as estrelas parecerem imóveis (fixas), isto é, por que as posições aparentes (paralaxe) das estrelas não mudavam em virtude do movimento anual da Terra em torno do Sol. Essa imobilidade, afirmava Aristarco, decorria da imensa distância em que se encontravam as estrelas em relação ao nosso planeta. A sua segunda hipótese, a rotação da Terra em torno de seu eixo, não era original, pois Heraclides já a havia considerado, conforme vimos acima. Registre-se que o **heliocentrismo** foi também defendido pelo matemático e físico grego Arquimedes de Siracusa (c.287-212) (no Prefácio de seu livro **Ampulheta**); pelo astrônomo babilônio Seleuco de Selêucia [c. 190 (?) a.C.]; e pelo astrônomo egípcio Sosígenes de Alexandria (f.c. 90 a.C.).

Na continuação de seus estudos em Astronomia, Aristarco preocupou-se, também, em determinar as distâncias Terra-Sol e Terra-Lua, bem como a relação entre os diâmetros desses três astros celestes e, tais medidas, foram apresentadas em seu livro **Sobre os Tamanhos e as**

Distâncias do Sol e da Lua. Para realizar essas medidas, ele usou os conhecimentos geométricos de Thales de Mileto e do matemático grego Euclides de Alexandria (c.323-c.285) (autor do livro **Elementos de Geometria**) pois, ao observar que quando a metade da Lua está iluminada pelo Sol, este, a Terra e seu satélite Lua, formam um triângulo retângulo, sendo a hipotenusa a distância Terra-Sol (dT-S). Assim, medindo a distância angular entre a Lua e o Sol (usando os instrumentos usuais de sua época como, por exemplo, a **esfera armilar** ou **astrolábio esférico**), tendo a Terra como vértice, Aristarco encontrou 87° (valor atual: $89^{\circ} 51'$). De posse desse resultado e por meio de uma construção geométrica simples, estimou que $dT-S \sim 8.000.000$ km (hoje: $dT-S \sim 149.600.000$ km), bem como observou que: $dT-L/dT-S = 1/20$ (hoje: $1/400$). Por outro lado, de suas observações sobre os eclipses lunares e lançando mão, também de construções geométricas simples, Aristarco concluiu que as relações entre os diâmetros da Lua (DL) e da Terra (DT) e o desta com o do Sol (DS) valiam, respectivamente: $1/3$ e $1/7$ (hoje: $1/3,67$ e $1/10,9$). Merece destaque acrescentar que Aristarco usou as primeiras **fórmulas** (geométricas, no caso).

Em torno de 290 a.C., os astrônomos gregos Timocharis de Alexandria (c.320-c.260 a.C.) e Aristyllus (f.c. 261 a.C.), parece que foram os primeiros a preparar (com **gnômons** e **esferas armilares**) um mapa celeste ocidental, no qual registraram a declinação de 18 estrelas. Além disso, no período (295-272 a.C.), Timocharis registrou ocultações lunares, assim como a passagem de Vênus por uma das estrelas *Virginis* (η *Virginis* ou *Zaniah*, *15 Virginis*), pertencente à *Constelação de Virgem*. Essas estrelas são menos massivas do que o Sol, mais com um grande brilho que lhe permite ser vista a olho nu em uma noite escura.

Já o diâmetro da Terra foi medido pelo astrônomo grego Eratóstenes de Cirena (c.276-c.196 a.C.), cerca de 240 a.C., usando o fato de que no **solstício de verão**, na cidade de Siene (atual Assuã), o Sol fica a pino no meio-dia. No entanto, nessa mesma hora, em Alexandria, a sombra de uma torre era projetada em um ângulo $\sim 7^{\circ}$. Assim, consultando os mapas oficiais, verificou que a distância entre essas duas cidades egípcias era ~ 5.000 estádios (~ 789 km). Desse modo, usando os conhecimentos geométricos de Tales de Mileto e de Euclides, foi fácil para Eratóstenes calcular a circunferência da Terra como sendo 39.425 km (hoje: 40.075 km). Ele também calculou a obliquidade da eclíptica, desenhou um mapa celeste, e teve a ideia do **ano bissexto**, com o intuito de ajustar o **calendário egípcio** às estações, segundo veremos mais adiante.

No entanto, o **Modelo de Apolônio (epiciclo-deferente)** apresentava uma dificuldade, qual seja, a de não explicar as variações das velocidades dos planetas em torno da Terra. Para contornar essa dificuldade, o astrônomo grego Hiparco de Nicéia (c.190-c.120) usou o conceito de **excentricidade**. Por exemplo, admitiu que o círculo descrito pelo Sol (considerado como um planeta) é excêntrico em relação ao centro da Terra. Com essa hipótese, demonstrou que essa **excentricidade** era equivalente ao **Modelo de Apolônio**, porém às avessas.

O trabalho incansável de Hiparco sobre os eclipses solares e lunares levou-o a construir uma **tabela de cordas** (ligando dois pontos localizados em um círculo cujo raio tomou como sendo unitário). Com auxílio dessa tabela e a divisão do círculo de 360° [proposto pelo astrônomo grego Hypsicles de Alexandria (c.150 a.C.)] - com as subdivisões do diâmetro em 120 partes, com cada uma dessas partes dividida em 60 partes [hoje, **minuto** (')] e estas, também, divididas em 60 partes [hoje, **segundo** (")], conforme haviam considerado os babilônios dos últimos séculos a.C. -, Hiparco encontrou os seguintes valores, em função do raio terrestre (RT): distância Terra-Sol ~

2.500 RT; distância Terra-Lua ~ 60 RT; raio do Sol ~ 12 RT e raio da Lua ~ 0,29 RT. Em virtude desse trabalho de Hiparco, ele é considerado como o "pai" da Trigonometria (que complementa a "trilaterometria" dos babilônios e egípcios) cujo nome foi cunhado na Renascença. Observe-se que esse trabalho "trigonométrico" de Hiparco foi completado pelo astrônomo grego Menelaus de Alexandria (70-140), em seu livro **Cordas em um Círculo**.

Hiparco foi também um astrônomo experimental, uma vez que preparou um **catálogo de estrelas**, a partir de 134 a.C., ano em que observou uma nova estrela na **constelação de Escorpião**. Ao concluir esse catálogo, em 129 a.C., havia registrado cerca de 1.080 estrelas, adotando a classificação por grandezas, indo até a sexta (6^{a}). Nesse seu trabalho experimental, lançou mão dos instrumentos usuais de sua época: **esfera armilar** ou **astrolábio esférico**; **mostrador circular**; e **dioptra** (ver detalhes desses instrumentos em verbetes do site: en.wikipedia.org/wiki), tendo ainda acrescentado a esse conjunto de aparelhos, o **astrolábio plano**. De posse desse mapa celeste, Hiparco redescobriu a **precessão dos equinócios**, ao comparar a diferença do tempo entre o **ano sideral** (tempo gasto pelo Sol para voltar à mesma estrela) e o **ano tropical** (tempo gasto pelo Sol para voltar ao mesmo **equinócio**). Desse modo, calculou o valor desse lento movimento circular dos **equinócios**, como sendo de um grau

(1^o) por século (valor atual: 1,38^o), correspondendo a uma volta completa em cerca de 26.000 anos.

O filósofo grego Possidônio de Apaméia (c.135-c.51 a.C.) calculou a circunferência da Terra usando, para isso, a posição da estrela *Canopus* em lugar do Sol. Contudo, talvez por não levar em consideração o deslocamento da estrela devido à refração atmosférica, encontrou o valor de ~ 30.000 km. Possidônio também calculou a DT-S como sendo de ~ 64.000.000 km (Aristarco: ~ 8.000.000 km e hoje: 149.600.000 km).

Em decorrência dessas **observações**, surgiu a necessidade de **inventar** um **calendário** (en.wikipedia.org/wiki/calendarios), assim como descrever a “passagem” do Sol, pelo céu de “estrelas fixas”. Desse modo, em 2.608 a.C., o Imperador chinês Houng-Ti, construiu um observatório para aquele objetivo. Ainda na China, sob o Império de Yao e por volta de 2.377 a.C., o **zodíaco** (*Kyklos Zodiakos*, do grego que significa *círculo de animais*) foi dividido em 28 **constelações** (agrupamento de estrelas). Durante a *Dinastia de Hammurabi* (1800-1400 a.C.), os astrônomos babilônios realizaram OV das transições do planeta Vênus através do disco do Sol, das fases da Lua e, com isso, organizaram um **calendário lunisolar**. Sob o Império dos Kassites e dos Assírios (1400-900 a.C.), organizou-se uma lista de **constelações helíacas** (que acompanham o Sol), assim como foram elaboradas as primeiras regras aritméticas para o cálculo da duração do **dia** e da **noite**.

Como os **relógios de Sol** só poderiam ser utilizados para medir o tempo durante o dia então, durante a noite (ou mesmo quando o tempo de dia estava nublado), os egípcios, por volta de 1.400 a.C., usavam **relógios de água**, conforme indica uma inscrição funerária encontrada na tumba do faraó Amenhotep I [floresceu cerca (f.c.) 16-15 Século a.C.]. Estes eram, basicamente, recipientes na forma de balde com um pequeno furo na base por onde a água se escoava. Escalas uniformes de tempo eram marcadas no interior do balde, uma para cada mês, por causa da variação das noites e, também, devido às estações do ano. É claro que a variação da viscosidade da água, por causa da variação de temperatura, tornava irregular o fluxo de água, dificultando, dessa forma, a precisão da medida do tempo.

Segundo o imaginário lendário, em 753 a.C., Romulus e Remus (filhos de Rhea Silvia, filha de Numitor, Rei de Alba Longa) fundaram a Cidade de Roma. Até então, no **calendário latino**, o **ano civil** constava de 304 dias divididos em dez (10) meses dos quais seis (6) tinham 30 dias cada e os outros quatro (4), tinham 31 dias cada. Março era o primeiro mês do ano, seguindo-se Abril, Maio, Junho, Quintilius, Sextilius,

Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro. É oportuno registrar que foi Numa Pompilius (f.c. 700 a.C.), o segundo Rei de Roma, quem introduziu os meses de Janeiro e Fevereiro (somando 51 dias) ao **calendário latino** e, portanto, no agora **calendário romano**, o **ano civil romano** terminava em Fevereiro e possuía 355 dias.

Ora, como com o correr dos anos, **relógios de Sol** mais precisos foram fabricados, portanto, um novo aspecto do **calendário romano** foi proposto pelo astrônomo babilônio Nabu-Rimani (f.c. 491 a.C.) ao elaborar uma tabela de efemérides contendo o registro das posições da Lua, do Sol e dos planetas em dado momento. Ele também calculou o intervalo do **mês sinódico** (entre duas Luas Novas consecutivas) como sendo de 29,530614 dias (valor atual: 29,530596 dias) e do **ano solar** em 365 dias, 6 horas, 15 minutos e 41 segundos. Por sua vez, o astrônomo Kiddinu (f.c. 397 a.C.) recalculou o **mês sinódico** e o **mês solar**, bem como descobriu a **precessão dos equinócios**, decorrente de uma ligeira rotação do eixo da Terra. O **equinócio** representa o ponto de intersecção da eclíptica (trajetória aparente do Sol entre o céu das **estrelas fixas**, vista no hemisfério norte) com o equador celeste (círculo da esfera celeste que coincide com o equador terrestre), no qual os **dias** e as **noites** têm a mesma duração. Há dois **equinócios** [do latim: *aequus* (igual) e *nox* (noite)]: o **equinócio do outono**, que ocorre em 21 ou 22 de Setembro, e o **equinócio da primavera** (ou **vernal**), 20 ou 21 de Março. É ainda importante destacar que no movimento aparente do Sol (no hemisfério norte), há dois outros pontos notáveis: os **solstícios** [do latim: *sol* e *sistere* (que não se mexe)], que são pontos nos quais o Sol se encontra mais afastado do equador celeste e, por isso, os **dias** são mais longos. O **solstício de verão**, que ocorre em 20 ou 21 de Junho, e o **solstício de inverno**, 21 ou 22 de Dezembro. No hemisfério sul, as estações são trocadas.

Parece haver sido Acax, Rei da Pérsia, o primeiro a possuir um **relógio de Sol**, por volta de 740 a.C. e, com o correr dos anos, **relógios de Sol** mais precisos foram fabricados. Assim, dentre tais **relógios**, um dos mais famosos foi construído pelo astrônomo babilônio Berossus (c.330-250 a.C.), feito de um bloco cúbico de pedra ou madeira, no qual foi cortada uma abertura hemisférica tendo uma haste no centro da mesma, cujo caminho percorrido por sua sombra que era, aproximadamente, um arco de círculo. O comprimento e a posição do arco variavam com as estações do ano. Esse **relógio de Berossus** foi usado por muitos séculos. Merece ser ainda acrescentado que, no mundo clássico greco-romano os **relógios de água** foram denominados de **clepsidras** (do grego: *kleptein* –

roubar; *hydor* – água). A **clepsidra** romana tinha a forma de um cilindro no qual a água gotejava de um reservatório. As leituras temporais eram feitas em uma escala por intermédio de um flutuador (boia). Parece que a mais famosa **clepsidra** foi construída por Ctesíbio de Alexandria (285-247), que continha um mecanismo movido à água que operava um cilindro rotativo, no qual estavam dispostas as horas desiguais do **dia** e da **noite**. Ele foi, também, o precursor do **relógio de cuco**, pois algumas de suas **clepsidras** eram dotadas de um fluxo constantes de água que operava toda espécie de alavancas e peças automáticas, assim como sinos, bonecos movediços e pássaros canoros. Merece destaque o fato de que em 240 a.C., houve o primeiro registro da aparição do **Cometa de Halley**, que foi identificado pelo astrônomo e matemático inglês Edmund Halley (1656-1742), em seu livro **A Synopsis of the Astronomy of Comets** (“Uma Sinopse da Astronomia dos Cometas”), em 1705, no qual fez uma análise usando a **Teoria Gravitacional Newtoniana** (de 1687, como veremos mais na frente) da órbita de 24 cometas aparecidos entre 1337 e 1698, concluindo que se tratava do mesmo cometa que ele próprio observara, em 1682, e por isso levou o seu nome.

Em 46 a.C., o Imperador romano Julius Caesar (100-44 a.C.) encarregou o astrônomo egípcio Sosígenes de Alexandria (f.c. 90 a.C.) para reformular o **calendário romano**. Assim, admitindo que o **ano trópico** (intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo **equinócio da primavera**) teria 365,25 dias, ele, então, aconselhou ao Imperador que o **ano solar** deveria conter 365 dias. Como a fração de 0,25 somaria 1 **dia** em cada quatro (4) anos, ela deveria ser compensada com o acréscimo de 1 **dia** ao **ano** após cada três (3) anos, que passaria, então a ter 366 dias. Note-se que essa ideia já havia sido apresentada pelo astrônomo grego Eratóstenes de Cirena (c.276-c.196), por volta de 240 a.C., para adaptar o **calendário egípcio** às estações. De posse dessa sugestão, Julius Caesar considerou então o **ano civil** de 365 dias, dividido ainda em 12 meses. No entanto, como havia uma diferença de dez (10) dias em relação ao **calendário romano** (de 355 dias, como vimos acima), o Imperador Julius determinou que esses 10 dias fossem acrescentados aos vários meses daquele calendário, da seguinte maneira: Janeiro, Sextilius e Dezembro ganharam dois (2) dias cada, enquanto Junho, Setembro e Novembro ganharam um (1) dia cada. Como Fevereiro era o último mês do **ano solar romano**, Julius Caesar decidiu, também, que o dia extra a ser acrescentado ao ano romano, de 4 em 4 anos, seria inserido nesse mês. Contudo, tendo o Imperador mandado colocar o dia extra entre o sétimo e o sexto dias antes das **Calendas de Março**, isto é, entre 24 e 23 de

Fevereiro, e não querendo alterar a ordem da contagem dos dias, o sexto dia foi contado duas vezes; daí a origem do nome **bissexto** atribuído a esse dia e, posteriormente, aos anos de 366 dias. É interessante registrar que os romanos dividiam o mês em três partes: **Calendas**, **Nonas** e **Idos**. As **Calendas** eram o primeiro dia do mês; os **Idos** eram o décimo-terceiro dia, exceto em Março, Maio, Quintilius e Outubro quando passavam para o décimo-quinto dia; as **Nonas** constituíam o oitavo dia anterior aos **Idos**. Registre-se, também, que o sexto dia para as **Calendas de Março** era um dia célebre em Roma, pois nele se realizava a **Festa de Regifuga**, que comemorava a fuga de Lucius Tarquinius Superbus (f.c. 2^a. metade do Século 6 a.C.), o sétimo e último Rei de Roma, cujo reinado ocorreu entre 534-510 a. C. Esse **Calendário Juliano** foi, na Antiguidade, modificado por duas vezes: na primeira, por ordem do General e Cônsul romano Marcus Antonius (c.81-30 a.C.), o mês Quintilius passou a ser denominado **Julius** (Julho) em homenagem a Julius Caesar; na segunda, o Senado Romano trocou o Sextilius para **Augustus** (Agosto), para homenagear o Imperador Romano Caesar Augustus (63-14 a.C.), o Primeiro Imperador Romano. No entanto, a fim de que **Augustus** não tivesse menos dias que **Julius** (que tinha 31), foi retirado um dia de Fevereiro para acrescentar aos 30 dias de **Augustus**.

É oportuno observar que os romanos associaram os meses e os dias [em um ciclo de sete dias (semana)], aos sete astros celestes conhecidos que giravam em torno da Terra: Sol, Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Assim, o primeiro dia é o **Domingo** (*dies Solis*, dia do Sol), **Segunda** (*dies Lunae*, dia da Lua), **Terça** [*dia de Tyr*, Deus Nórdico da Guerra / *martedi*, dia de Marte (Deus Romano da Guerra)], **Quarta** [*dia de Woden*, Deus Supremo dos Nórdicos / *mercoledi*, dia de Mercúrio (Deus Romano dos Comerciantes), correspondente a Hermes (Deus Grego Mensageiro dos Deuses)], **Quinta** [*dia de Thor*, Deus Nórdico do Trovão / *Giovedi*, dia de Júpiter (Deus Romano dos Céus), correspondente a Zeus (Deus Grego do Céu e do Tempo)], **Sexta-feira** (*dia de Frigga*, Deusa escandinava da fertilidade da terra) e **Sábado** [*dies Saturni*, dia de Saturno (Deus Romano da Plantação), correspondente a Cronus (Deus Grego da Agricultura)].

Para os meses, os romanos deram os seguintes nomes: **Janeiro** (*Janus*, Deus do Início e do Fim), **Fevereiro** (*Februalia*, mês em que se realizavam festas de purificação religiosa), **Março** (*Marte*, Deus Romano da Guerra), **Abril** [de *aperire*, que em latim significa “aberto”, mês em que as flores abriam / de *Vênus* (Deusa Romana das Flores), correspondente a *Afrodite* (Deusa Grega do Amor)], **Maio** (*Maia*, Deusa do Crescimento das

Plantas), **Junho** [*Juno* (Deusa Romana da Bondade ou da Juventude), esposa de Júpiter, correspondente a Hera (Deusa Grega)], **Julho** (devido a Julius Caesar, conforme vimos antes), **Agosto** (devido a Augustus, como também vimos acima), **Setembro** (*septem*, o sétimo mês), **Outubro** (*octo*, o oitavo mês), **Novembro** (*novem*, o nono mês) e **Dezembro** (*decem*, o décimo mês).

1.2. A Consolidação dos Calendários na Era Cristã no Período: Século 1- Século 15

Na **Era Cristã** (iniciada no ano de nascimento de Jesus Cristo ou 01 d.C.), em 157 d.C., Scipio de Nasica levou para Roma um exemplar de uma **clepsidra**. Por volta de 250 d.C., outro tipo de dispositivo usado para medir o tempo foi a **ampulheta** (do vocábulo romano *ampulla*, que significa redoma), constituída de dois globos, inicialmente de cerâmica e depois de vidro, juntos por um pequeno disco de metal com um furo no centro. A contagem do tempo era feita pelo escoamento de certa quantidade da areia de um globo para o outro. Em 563 d.C., durante o *Concílio da Igreja Católica* realizada na cidade portuguesa de Braga, o Bispo de Martinho de Braga (c.520 –c.580) decidiu que os nomes dos dias em homenagem aos deuses pagãos, deveriam, a partir do segundo até o sexto, terem acrescentados a eles o nome **feira** (originária da palavra latina *feria*, que significa “dia de descanso”) e, assim, os dias da semana passariam a ser: **Domingo, Segunda-feira, Terça-feira, Quarta-feira, Quinta-feira, Sexta-feira** e **Sábado**. Contudo, esta denominação só é usada nos países de língua portuguesa.

O monge e erudito Dyonisius Egyguus (c.470-c.544 A.D.) (nascido na Scythia Minor, hoje Dobruja, entre România e Bulgária) estabeleceu a data de nascimento de Jesus Cristo como a origem da **Era Cristã** (EC), e na qual os anos são contados pelo complemento A.D., que significa **Anno Domini** (*Ano do Senhor*). Assim, segundo Dyonisius, o ano de nascimento de Cristo foi tomado como 1 A.D., cuja anunciação aos Três Reis Magos, seria a passagem do **Cometa de Halley** (ver adiante). Portanto, temos Jesus Cristo (1-33 A.D.). É oportuno salientar que alguns historiadores da ciência acreditam que foi o erudito inglês Beda, o Venerável (673-735) quem introduziu a notação A.D. para representar a Era Cristã (EC).

Em 16 de julho de 622, o líder político árabe Abu al-Qasim Muhammad ibn'Abd Allah ibn'Abd al-Muttalib ibn Hashim (Profeta Maomé) (c.570-632) fugiu de Meca para Medina, fuga essa conhecida

como *Hégira* e, a partir desse dia [1 AH (*Anno Hegirae*)], começa o **calendário muçulmano (islâmico)**, que é um **calendário lunar** composto de 12 meses de 29 ou 30 ao longo de um ano com 354 ou 355 dias.

Note-se que, em 721 d.C., o astrônomo chinês Y. Hang construiu uma **clepsidra mecânica** que indicava o movimento dos astros e, em 885 d.C., o Rei de Wessex, Alfredo o Grande (849-899) usou **velas** para medir o tempo.

Em torno de 1220 d.C., o astrônomo e matemático escocês John de Holywood (Johannes de Sacrobosco) (1190-1244) escreveu o livro **De Sphaera Mundi** (“Da Esfera do Mundo”), no qual explicou o nascente e o poente helíacos dos astros, isto é, que ocorrem junto com o Sol, assim como explicou também os **signos zodiacais** [♈ - **Áries / Carneiro** (21 de março - 20 de abril); ♉ - **Touro** (21 de abril - 20 de maio); ♊ - **Gêmeos / Gêmeos** (21 de maio - 20 de junho); ♋ - **Câncer / Caranguejo** (21 de junho - 21 de julho); ♌ - **Leão** (22 de julho - 22 de agosto); ♍ - **Virgem** (23 de agosto - 22 de setembro); ♎ - **Libra** (23 de setembro - 22 de outubro); ♏ - **Escorpião** (23 de outubro - 21 de novembro); ♐ - **Sagitário** (22 de novembro - 21 de dezembro); ♑ - **Capricórnio** (22 de dezembro - 20 de janeiro); ♒ - **Aquário** (21 de janeiro - 19 de fevereiro); e ♓ - **Peixes** (20 de fevereiro - 20 de março)].

Por volta de 1232, Sacrobosco publicou o texto denominado **De Computus Ecclesiasticus/De Anni Ratione** (“Do Cálculo Eclesiástico”/“Dos Anos Racionais”), no qual estudou a divisão do tempo em dias, meses e anos, divisão essa relacionada com os movimentos do Sol e da Lua. Com isso, ele mostrou a grande diferença entre as estações e o **Calendário Juliano** e, então, sugeriu uma alteração neste calendário que somente foi realizada no Século 16, pelo Papa Gregório XIII [Ugo Boncompagni (1502-1585)], como veremos logo adiante. Foi também de Sacrobosco a ideia de realizar cálculos com números inteiros não-negativos, apresentada no livro **De Algorismus/De Arte Numerandi** (“Do Algoritmo”/“Da Arte Numérica”).

Ainda com a relação à **Horologia**, é oportuno frisar que, em 1364, Giovanni de Dondi (1318-1389) construiu um relógio e o instalou na Biblioteca do Castelo Visconti. Ele continha sete (7) mostradores, cada um deles simbolizava um planeta com todos os dados astronômicos e apresentava, também, outro mostrador extra para marcar o tempo. Mais tarde, em 1386, foi construído um relógio e instalado na torre da Catedral de Salisbury, na Inglaterra. Nesse relógio, basicamente, o tempo era medido pelo movimento mecânico periódico de uma pesada barra que era

empurrada, ora num sentido, ora noutro por uma roda dentada que avançava por um espaço de um dente de cada oscilação dupla da barra. A roda, por sua vez, era movida por um peso suspenso em um tambor. Um relógio semelhante a esse foi instalado, em 1389, na Catedral de Rouen, na França.

Registre-se que, no decorrer do Século 14 d.C., a **ampulheta** foi bastante utilizada no mar, e durante os Séculos 16 e 17 d.C., ela era usada nas Igrejas para medir o tempo dos sermões. Ainda no Século 17 d.C., relógios tipo **candeeiro** foram bastante utilizados, por intermédio da queima de um pavio imerso em óleo e a escala do tempo era dada pelo abaixamento de seu nível no interior do recipiente no qual estava contido.

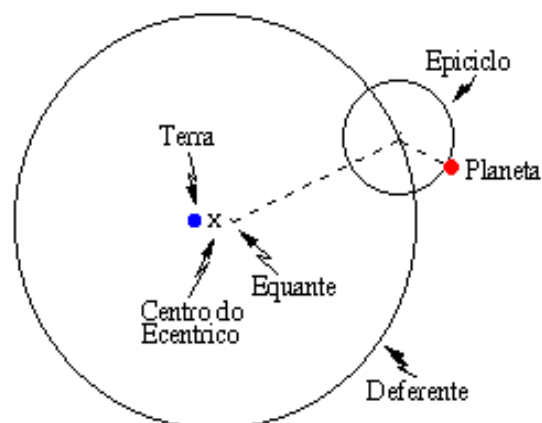
Uma primeira tentativa de reformar o **Calendário Juliano** (CJ) aconteceu, em 1475, quando o Papa Sixto IV (Francesco Della Rovere (1414-1484) (o iniciador da decoração da famosa **Capela Sixtina**) solicitou essa reforma ao astrônomo alemão Johannes Müller Königsberg [Regiomontanus(no)] (1436-1476), o que não aconteceu pela morte prematura deste astrônomo, aos 40 anos de idade. Essa reforma só aconteceu no Século 16, como veremos mais adiante. Em 1558 (e, posteriormente, em 1570) que o Papa Pio V (Antonio Ghislieri) (1504-1572) mandou publicar um novo **Breviário** tentando ajustar as tabelas lunares e o sistema de anos **bissextos**, já que foi observado uma diferença de cerca de dez (10) dias entre os anos **trópico** e **juliano**, diferença essa que fazia com que a Lua Nova astronômica ocorresse quatro dias antes da eclesiástica. Essa diferença provocava uma alteração na data da Páscoa, pois esta é fixada como sendo o domingo seguinte à Lua Cheia Eclesiástica (sendo esta definida como sendo o décimo-quarto dia de uma luação tabular, onde o primeiro dia corresponde à Lua Nova) que sucede ao equinócio da Primavera (Vernal).

A reforma do CJ começou em 24 de Fevereiro de 1582, quando o Papa Gregório XIII editou a Bula Papal *Inter Gravissimus*, na qual há recomendações para executá-la. Assim, como no CJ havia três anos **bissextos** a mais em cada 385 anos, e, por isso, a ocorrência dos **equinócios** e **solstícios** [dia em que o Sol está mais afastado (norte ou sul) do equador] se afastava de suas datas tradicionais: por exemplo, a data do **equinócio da primavera** determinava a **Páscoa**. Em vista disso, o Papa Gregório XIII solicitou ao astrônomo e médico italiano Aloysius Lilius (Luigi Lilio, Luigi Giglio) (c.1510-1576) [que foi auxiliado pelo matemático alemão o jesuíta Christophorus Clavius (1537-1612)], para fazer a reforma do CJ: nascia, portanto, o **Calendário Gregoriano** (CG). Este foi construído da seguinte forma: a **Quinta-feira**, 04 de outubro de 1582 (CJ), foi seguida

pela **Sexta-feira**, 15 de outubro de 1582 (CG). Desse modo, os anos **bissextos** passaram a ocorrer nos anos exatamente divisíveis por quatro (4), salvo os anos que terminam em 00, que devem ser divisíveis por 400, para que também fossem **bissextos**. Desse modo, por exemplo, os anos 1600 e 2000, são **bissextos**, diferentemente dos anos 1800 e 1900 que não o são. Essas alterações, posteriormente, levaram à correção do ano de nascimento de Jesus Cristo: 4 d.C.

1.3. Modelo Geocêntrico de Ptolomeu

Entre 151-157 d.C., o astrônomo grego Cláudio Ptolomeu (85-165) retomou o **modelo Apolônio-Hiparco** (epiciclo-deferente-excêntrico) em seu célebre **Megale Mathèmatikè Syntaxis** (“Grande Compilação Matemática”), para poder explicar o movimento dos planetas e suas irregularidades (movimento retrógrado e não-circularidade orbital). Sua obra, composta de 13 volumes, foi traduzida pelos árabes, por volta do Século 9 d. C., recebendo então o nome de **Al-Magisti** ou **Almagest** (“O Grande Tratado”) [Ptolomeu, C. **The Almagest (Great Books, 15)** (Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1993)]. É oportuno registrar que para explicar a razão dos planetas Mercúrio e Vênus aparecerem sempre juntos ao Sol, Ptolomeu admitiu que seus deferentes tivessem o mesmo período do deferente do Sol. Por fim, para explicar as variações das velocidades dos planetas, criou o artifício do **equante**. Este é um ponto que não correspondia nem ao centro da Terra, nem ao centro do deferente e, de tal modo, que um objeto colocado nele veria o centro do epiciclo se deslocar com velocidade angular uniforme (*Google Imagens*).



O **modelo ptolomaico** [Karlson, P. **A Magia dos Números** (Editora Globo, 1961); Kline, M. **Mathematical Thought from Ancient to Modern Times** (Oxford University Press, 1972); Boyer, C. B. e Merzbach, U. C. **História da Matemática** (Blucher, 2012)] continuou sendo ampliado com novas contribuições. Com efeito, o astrônomo hindu Aryabata I (476-c.550) afirmou que: - *A esfera das estrelas fixas é estacionária e a Terra, realizando uma revolução, produz o nascimento e o ocaso diário das estrelas e planetas.* Aliás, foi Aryabata que adotou um raio de ~ 3.439 unidades [lembrar que: $C = 2 \pi r \rightarrow r \sim 360 \times 60 / (2 \times 3,14)$] para calcular as *semicordas* dos arcos, mais tarde conhecidas como **senos**, como veremos mais adiante. Portanto, segundo essa adoção, por exemplo, vê-se que o **seno** de 30° , considerado como a metade da corda do arco de 30° , vale 1.749 (hoje: 0,5). Registre que os hindus trabalhavam com o equivalente ao nosso **cosseno**, e eles consideravam o **seno** como o complemento do arco considerado para calcular o **cosseno**. Por sua vez, o erudito espanhol Isidoro de Sevilha (c.560-636) e Beda, o Venerável, acreditavam na esfericidade da Terra, na rotação diurna da abóbada celeste, no movimento dos planetas para leste, para oeste e no movimento anual do Sol. Já para o astrônomo e matemático hindu Brahmagupta (c.598-660) a Terra era estática, conforme afirmou em um livro que escreveu, por volta de 628, no qual apresentou a Astronomia, em versos, bem como dedicou dois capítulos para estudar a progressão aritmética (deduzindo a soma da série de números naturais), equações do segundo grau e a Geometria Euclidiana. Com esta, ele encontrou as áreas de triângulos, quadriláteros e círculos, bem como volumes e superfícies laterais de pirâmides e cones.

Contudo, o erudito inglês Alcuíno de York (735-804), ao dirigir em Paris a reforma educacional proposta pelo imperador franco-alemão Carlos Magno (742-814), defendeu a ideia do **modelo geo-heliocêntrico de Heraclides**.

Merece ser ainda destacado que, com o objetivo de fazer OV dos céus, o Califa árabe Abu Já'far Abdullah al-Ma'mun ibn Harun ("Almamon") (786-833) construiu uma série de observatórios planetários. Com eles, o matemático e astrônomo árabe Abu Já'far Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi (c.780-c.850) preparou uma série de tabelas astronômicas (*zij*, em árabe) de futuras posições planetárias e estelares, assim como organizou uma geografia mundial, baseados nos livros de Ptolomeu: o citado **Megale** e o **Geographike Hyphegesis** ("Guia à Geografia"). Destaque-se que esse matemático imortalizou-se pelo termo

álgebra que deriva da tradução latina da palavra **al-Jahr** que faz parte do título de seu célebre livro **Ilm al-Jahr wal' Muqabalah** (“A Ciência da Transposição e da Supressão”), publicado em 830. Aliás, o próprio nome de al-Khwarizmi foi distorcido para **algorismo** (“a arte de calcular”).

Novos resultados e acertos no **modelo ptolomaico** continuaram a ser obtidos no período considerado neste item (Século 1 d.C.- Século 17 d.C.). Desse modo, o astrônomo árabe Abu-Abdullah Muhammad ibn Jabir al-Battani (Albatênio) (c.858-929) (filho de um construtor de instrumentos astronômicos), melhorou os instrumentos conhecidos (**relógio de sol** e **esfera armilar**), bem como elaborou um novo: o **quadrante mural**. Com estes, obteve melhores resultados que os de Ptolomeu, como, a posição correta do **afélio** (ponto mais afastado do Sol em relação ao nosso planeta), o valor do **ano solar**, da inclinação da eclíptica e das estações. Além do mais, aventou a possibilidade dos eclipses anelares do Sol e atualizou as tabelas astronômicas ptolomaicas, substituindo os métodos geométricos dos gregos por **trigonométricos**, utilizando para isso (e de modo pioneiro) uma **tabela de senos**, apresentada por ele em seu livro **Kitab al-Zig** (“Livro das Tabelas Astronômicas”). Antes de prosseguir, é interessante registrar como surgiu a palavra **seno**. Os astrônomos hindus trabalhavam com a **semicorda** dos arcos, cuja expressão em hindu (*jiva*) foi traduzida pelos árabes como *jiba*. Contudo, existe em árabe a palavra *jaib*, que significa “golfo” ou “enseada”. Portanto, quando o linguista inglês Robert of Chester (Robertus Castrensis) (f.c.1150), já em 1145, traduziu os textos árabes, confundiu *jiba* com *jaib*, e deu-lhe, desse modo, o correspondente nome latino: **sinus (seno)**.

A observação (OV) e a descrição das estrelas continuaram a ser realizadas pelo astrônomo árabe Abu'l-Husayn al-Sufi (903-936) conforme as registrou em seu livro **Das Constelações das Estrelas Fixas**, e cujos nomes árabes de algumas delas (e dados por ele) ainda hoje permanecem: Aldebarã, Altair, Betelgueuse e Ritel.

Já o astrônomo persa Abu al-Wafa' (al-Buzajani) (940-948), que trabalhava no **Observatório de Bagdá**, elaborou novas tabelas astronômicas, utilizando a atual função **tangente** e sua inversa, a **cotangente**, já de uso regular pelos astrônomos árabes [por exemplo, o também médico e filósofo Thabit (Tâbit) ibn-Qo(u)rra (826/836-901) e Albatênio], bem como inventou as funções **secante** e **cossecante** para representar, respectivamente, o inverso do **cosseno** e do **seno**; ele também preparou uma tabela de **senos** e **tangentes** para cada dez minutos (10') de arco. Por sua vez, o médico e filósofo persa Abu-Ali al-Husain ibn Abdullah Ibn Sina (Avicena) (980-1037) defendeu a hipótese de

que todos os corpos celestes possuíam luz própria. É oportuno destacar que, no primeiro milênio da EC (d.C.), a Astronomia Árabe caracterizou-se, principalmente, por representar as posições dos astros terrestres por intermédio de duas coordenadas: **altitude** (altura) e **azimute** (posição). Sendo esta medida a partir do norte verdadeiro e ao longo do horizonte.

O segundo milênio d.C. começou com novas contribuições ao entendimento do céu das estrelas fixas, sendo estas realizadas por parte de astrônomos árabes, chineses e japoneses, com seus registros precisos das **supernovas** (“explosões estelares”) de 30 de abril de 1006 e 04 de julho de 1054, nas constelações de **Lobo** (“Lupus”) e de **Touro** (“Taurus”), respectivamente. A de 1006, inicialmente, brilhou como Vênus e permaneceu visível à noite por mais de um ano; ela também foi registrada no Ocidente, porém confundida com um cometa. No início, a de 1054, era mais brilhante do que Vênus e, portanto, foi vista de dia por 23 dias, e deixou em Touro uma grande mancha brilhante e que, mais tarde, no Século 18, identificada como seu **remanescente óptico**. Note-se que os astrônomos chineses localizavam os astros celestes por intermédio de coordenadas equatoriais: **distância polar norte** e **ascensão reta**. Sendo esta medida a partir da interseção da eclíptica com o equador celeste e ao longo deste. Por seu lado, a **distância polar norte** (hoje: **declinação**) era marcada a partir do polo norte celeste (considerado como o ponto central do céu e, por isso, foi considerado por eles como representante de seu Imperador, que se situava no centro do Universo) e ao longo do meridiano (círculo resultante da interseção de planos perpendiculares ao equador celeste) do astro considerado.

Por outro lado, o astrônomo armênio Abu Ar-Rayan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni (973-c.1051) desenvolveu uma teoria sobre a rotação da Terra em torno de seu próprio eixo, bem como apresentou acurados cálculos de **latitude** [distância ao Equador Terrestre (ET) medida ao longo do Meridiano de Greenwich (MG) e que varia de 0° até 90° , para o polo norte (N) ou para o polo sul (S)] e de **longitude** [distância ao MG (considerado como 0°) e medida ao longo do ET e pode variar de 0° até 180° , para leste (E) ou para oeste (W)]. Ele também determinou o ângulo da eclíptica com o equador terrestre: $23^{\circ} 34' 0''$ (valor atual: $23^{\circ} 34' 45''$). Registre-se que ele demonstrou a hoje conhecida **lei dos senos** nos triângulos planos: - *Em um triângulo plano com ângulos A, B, C e os respectivos lados opostos a, b, c, tem-se: $a/\text{sen } A = b/\text{sen } B = c/\text{sen } C$.*

Sendo Diretor do *Observatório de Merv*, o astrônomo, matemático e poeta persa Cheyás Umar ebn Ebrahim al-Khayyami (Omar

Kháyyám) (c.1048-c.1131) – autor do famoso livro de versos escritos em quartetos: **Rubáiyát** – atualizou tabelas astronômicas, as conhecidas **Tabelas Malikshah**. Em 1074, fez a reforma do **calendário muçulmano (islâmico)** e, por volta de 1079, escreveu o melhor livro sobre Álgebra.

O filósofo árabe Abu-al-Walid Muhammad ibn Rushd (Averróis) (1126-1198) rejeitou o **modelo ptolomaico**, criticando principalmente o artifício do **equante** e voltou-se para o **modelo de Calipo-Eudoxo-Aristóteles**, havendo, por intermédio de vários artifícios geométricos, reduzido as 55 esferas desse modelo, para apenas 47. Observe-se que o **equante** também foi rejeitado pelo astrônomo espanhol Abu Muhammad Jabir ibn Afflah (1100-1150), que foi importante para o desenvolvimento da Astronomia por haver inventado o **torquetum**, uma espécie de **astrolábio** e usado para registrar e converter medidas celestes realizadas em três sistemas de coordenadas: horizontal, equatorial, e elípticas (hoje o chamaríamos de **computador analógico**).

Segundo vimos anteriormente, por volta de 1220, Johannes de Sacrobosco escreveu o livro **De Sphaera Mundi** (“Da Esfera do Mundo”), no qual explicou o nascente e o poente helíacos dos astros, isto é, que ocorrem junto com o Sol. Ainda nesse livro, ele usou o **modelo ptolomaico** e realizou demonstrações dos movimentos dos planetas e do Sol, assim como também explicou as causas dos eclipses lunares e solares.

Em 1252, data de sua coroação, o Rei espanhol Alfonso X de Castela e Leão (1221-1284) apresentou as famosas **tabelas Alfonsinas**, registros astronômicos preparados por um grupo de sábios cristãos e judeus reunidos em Toledo, sob sua coordenação. Ao preparar os dados dessas tabelas, e tendo em vista o grande número de ciclos e de epiciclos do **modelo ptolomaico**, teria pronunciado a seguinte frase: - *Se Deus tivesse me consultado por ocasião da criação do Universo, Ihe teria recomendado um sistema mais simples.*

Ainda no Século 13 novos dispositivos foram desenvolvidos para melhorar a observação (OV) dos astros no céu. Com efeito, em 1267, o filósofo inglês, o monge franciscano Roger Bacon (c.1219-c.1292) publicou seu famoso **Opus Majis** (“Obra Maior”), no qual apresentou a ideia de se usar **lentes** para olhar para o Sol, a Lua e as estrelas. Com essa ideia, ele antecipou a invenção do **telescópio** (en. wikipedia.org/telescopio). Observe-se que uma das mais antigas referências ao uso de uma **lente** (“lupa”) parece haver ocorrido em 423 a.C., por ocasião da encenação da peça **As Nuvens** (“Nephelai”, em grego) do teatrólogo grego Aristófanes (c.450-c.388). Nela, um velho velhaco de nome Strepsíades, depois de consultar o filósofo grego Sócrates de Atenas (c.427-c.399) usa um vidro

polido para focar os raios de Sol sobre um tablete de cera e, com isso, apagou um registro de um débito de jogo. Contudo, o uso sistemático de **lentes** aconteceu quando, por volta de 1038, o físico e matemático iraniano Abu-’Ali Al-Hasan Ibn Al-Haytham (Al-Hazen) (c.965-1038) publicou o livro intitulado **Kitab Al-Manazer** (“Tesouro da Óptica”), no qual mostrou que o poder de ampliação das **lentes** (formadas pelo polimento de vidros que os tornava com a forma esférica) era devido à sua curvatura, e não a uma propriedade intrínseca do vidro, conforme a opinião da época.

Descrições do uso do **torquetum** foram apresentadas por Bernardus de Virduno (f.c.1280) em seu livro **Tractus super totum astrologium** e por Franco da Polônia em um texto publicado em 1284. Por sua vez, usando esse novo **invento**, Peter de Limoges especificou, em 1299, a posição dos cometas em termos de latitude e de longitude, com destaque para o cometa aparecido no 18^o da constelação de **Taurus**.

É interessante mencionar que, ainda no Século 13, a sistematização da Trigonometria Plana e Esférica foi realizada pelo astrônomo árabe Nasir ed-din at Tusi (Nâsir Eddin) (1201-1274) no livro intitulado **Treatise on the Quadrilateral** (“Tratado sobre o Quadrilátero”), no qual deduziu as fórmulas fundamentais para resolver triângulos mais gerais, particularmente de triângulos esféricos retos, aqueles cujos três ângulos internos são perpendiculares. Mencione-se também, que o matemático italiano Leonardo de Pisa (Fibonacci) (1170-1230), em seu livro **Pratica Geometriae** (“Geometria Prática”), publicado em 1220, divulgou a **tabela de senos** usada pelos gregos e romanos, por intermédio de algarismos arábicos.

Nos Séculos seguintes, do 14 ao 17, o **torquetum** continuou a produzir novos e importantes resultados para o **modelo ptolomaico**. Assim é que, em 1315, Geoffrey de Maux trabalhou com esse instrumento para calcular a posição (em termos de latitude e longitude) de novos cometas. Entre c.1318 e 1344, o astrônomo francês Jean de Murus (famoso por divulgar as **tabelas Alfonsinas** na Idade Média), também obteve informações sobre novos cometas e, em 12 de março de 1318, registrou a entrada do Sol na constelação de **Aires** (“Carneiro”). Ainda no Século 14, o erudito Alberto da Saxônia (c.1316-1390) em seu **Quaestiones Super Quator Liber de Caelo et Mundi** (“Questões Sobre o Quarto Livro do Céu e do Mundo”) sustentou a tese de que todas as estrelas e planetas recebiam sua luz do Sol. Por sua vez, o astrônomo islâmico al-Din ibn al-Chatir (f.c. Século 14) substituiu o **equante** por epiciclos extras.

Em 1330, o filósofo, astrônomo, matemático e rabino francês Levi ben Gershon (Gersonides) (1288-1344) construiu o instrumento denominado **bastão de Jacob** [bastão de 1,4 m de comprimento por 2,5 cm de largura, com seis ou sete tabletes perfurados (correspondendo a uma fração do tamanho do bastão), que poderiam deslizar, transversalmente, ao longo do mesmo] objetivando determinar a distância angular entre astros celestes por intermédio do conhecimento de suas **paralaxes** (deslocamento de uma estrela visto por observadores em locais diferentes). Depois de observar um eclipse lunar (03 de outubro de 1335) e um eclipse solar (03 de março de 1337), Levi recusou o **modelo ptolomaico** e, portanto, para ele, a **Via Láctea** era uma esfera de estrelas fixas que brilhavam refletindo a luz do Sol que ficava no centro do sistema planetário.

No Século 15 foram dadas novas contribuições para o entendimento do movimento dos astros no céu das **estrelas fixas**. Com efeito, em 1402, o erudito e humanista italiano Jacobus Angelus (Jacopo d'Angelo) (c.1360-c.1411) usou o **torquetum** para localizar cometas por intermédio das coordenadas angulares (latitude e longitude). Mais tarde, em 1420, o astrônomo mongol Ulugh Begh (1394-1449) fundou em Samarcanda, na Ásia Central, uma **madrasa**, isto é, um *Instituto de Altos Estudos* centrado em Astronomia. Em 1424, foi nele construído um grande observatório, localizado em um prédio de três andares, possuindo um **sextante girante**, até então o maior instrumento astronômico mundial. Nesse observatório, Begh realizou observações que o levaram a encontrar erros nas tabelas organizadas por Ptolomeu. Assim, o então único cientista mongol da Idade Média preparou sua própria tabela (**zig**), que ficou conhecida como **zig-i gurgani (tabela de Ulugh Begh)**, já que Ulugh Begh usava também o título de **guragon**. Essa tabela apresenta um mapa celeste com 994 estrelas, que é o primeiro mapa original desde o preparado por Hiparco. Observe-se que, em 1433, o matemático florentino Paolo Toscanelli (1397-1482) iniciou suas observações cometárias, construindo seus próprios instrumentos, observações essas que foram completadas em 1472.

Em 1440, o astrônomo, matemático e filósofo alemão, o Cardeal Nicolau de Cusa (1401-1464) publicou o livro **De Docta Ignorantia** ("A Doutra Ignorância"), no qual afirmou que a Terra girava em torno de seu eixo e em torno do Sol, que o Universo era infinito, e que as estrelas eram outros sóis com planetas habitados. Há ainda nesse livro uma ideia revolucionária: o **Princípio Cosmológico** segundo o qual o observador verá o Universo girar em torno de si, em qualquer parte que esteja no mesmo,

isto é: no Sol, na Terra, na Lua, em qualquer planeta ou mesmo estrela, como veremos mais adiante.

O astrônomo austríaco George von Puerbach (1423-1461) era partidário da ideia de Aristóteles sobre as esferas cristalinas nos quais os planetas se situavam. Foi um fabricante de instrumentos astronômicos e, com os mesmos, recalculou efemérides celestes com o objetivo de corrigir as **tabelas Alfonsinas**. Para essa tarefa, utilizou uma tabela de **senos naturais**, ao invés de cordas, **senos** esses calculados com a diferença de dez minutos (10'). Os valores desses **senos** foram escritos em algarismos arábicos, algarismos estes que já haviam sido difundidos na Europa por Fibonacci. É interessante ressaltar que esses *cálculos trigonométricos* não apresentavam essa denominação, uma vez que o termo **Trigonometria** só apareceu no livro de Barholomeus Piticus (1561-1613), chamado **Thesaurus** (“Tesouro”), publicado em 1613. Puerbach, com auxílio de um rico colecionador de manuscritos gregos, de Nice, começou a traduzir do grego, bem como aperfeiçoar e corrigir o **Megale** de Ptolomeu. Contudo, essa tradução denominada por ele de **Epitoma Almagesti Ptolomaei** [“Resumo (Epítome) do Almagesti de Ptolomeu”] não foi concluída, em virtude de sua morte prematura aos 38 anos de idade.

Um discípulo de Puerbach, o astrônomo e matemático alemão Johannes (Johann Müller von Königsberg) Montaregio (Regiomontanus/no) (1436-1476), em 1471, montou em sua própria casa, em Nurenberg, um observatório dotado de um atelier e da espetacular novidade da época, a **imprensa**, que havia sido inventada pelo alemão Johannes Gutenberg (c.1398-c.1468), por volta de 1438. No ano seguinte, em 1472, com auxílio intelectual e financeiro de seu aluno, o rico mercador alemão Barnhard Walther (1436-1504), Regiomontano fez observações muito precisas de um brilhante cometa aparecido em janeiro desse ano, graças às quais ele foi identificado dois séculos mais tarde como o famoso **Cometa de Halley**. Em seu livro intitulado **Dezessete Perguntas sobre Cometas**, Regiomontano descreveu um método para determinar a paralaxe de um cometa, extrapolando o descrito por Ptolomeu para obter a distância Terra-Lua. Embora solicitado por seu mestre Puerbach (quando este estava em seu leito de morte) para concluir o **Epitoma**, Regiomontano não pôde fazê-lo também por morte prematura, aos 40 anos de idade, morte esta que também o impediu de trabalhar na reforma do CJ, como anotamos antes. Observe-se que foi esse astrônomo que deu continuidade ao estudo da Trigonometria (Plana e Esférica), realizado entre 1462 e 1463, e apresentado em seu tratado intitulado **De Triangulis Omnimodis** (“Sobre os Triângulos de todas as

Espécies”), composto de quatro livros, nos quais apresentou a **lei dos senos** para triângulos planos (vista acima) e esféricos, esta dada pela expressão: $\frac{\text{sen } a}{\text{sen } A} = \frac{\text{sen } b}{\text{sen } B} = \frac{\text{sen } c}{\text{sen } C}$. Ele também deduziu a **lei dos cossenos** para triângulos planos e esféricos, cujas expressões são, respectivamente: $\cos A = \frac{c^2 + b^2 - a^2}{2bc}$; $\cos a = \cos b \cos c + \text{sen } b \text{sen } c \cos A$. Registre-se que nos triângulos esféricos, os lados (a, b, c) são arcos de círculo e, portanto, são dados também em unidades de ângulo [grau (°), minuto (′) e segundo (″)]. É oportuno destacar que Regiomontano, para construir sua **tabela de senos**, usou raios em unidades de 6×10^5 , 10^8 e 6×10^8 . Contudo, para sua **tabela de tangentes** (que ele apenas chamava de “tabela de números”) e apresentada no livro **Tabulae Directionum** (“Tabelas Dirigidas”), escrito entre 1464-1467 e publicado em 1490, ele usou raios em unidades de 10^5 . Observe que, como o livro de Regiomontano só foi publicado em 1533, nesse meio tempo, o astrônomo e matemático alemão Johannes Werner (1468-1522/1528) melhorou e publicou as ideias de Regiomontano no livro intitulado **De Triangulis Sphaericis** (“Sobre os Triângulos Esféricos”), em 1514.

1.4. Modelos Heliocêntricos

1.4.1. As Primeiras Tentativas do Heliocentrismo: os Modelos Geoheliocêntricos

Muito embora o **geocentrismo** fosse o modelo “natural” para explicar o movimento dos astros celestes no céu de “estrelas fixas”, pois as pessoas viam o Sol “nascer” (**nascente**) e depois se “por” (**poente**), conforme os astrônomos da Antiguidade registraram que existiam certos aspectos desse **geocentrismo** que não eram entendidos. Três aspectos eram intrigantes: 1) As estrelas parecerem fixas, isto é, suas posições aparentes não mudavam em consequência do movimento da Terra em torno do Sol; 2) Os planetas Mercúrio e Vênus se afastarem pouco do Sol, $\sim 24^\circ$ e $\sim 48^\circ$, respectivamente; 3) O **movimento retrogrado**, isto é, o movimento no qual o planeta, no céu das **estrelas fixas**, se move em um determinado sentido até um “ponto estacionário”; depois, volta no sentido oposto até outro “ponto estacionário”, retomando então ao primeiro sentido, e assim por diante, formando “laços”. As duas primeiras dificuldades foram contornadas pelo astrônomo grego Heráclides de Pontos (c.388-c.310), por intermédio do **modelo geoheliocêntrico**. Segundo esse modelo, esses dois planetas giravam em torno do Sol e este,

juntamente com os demais planetas (Lua, Marte, Júpiter e Saturno), girava em torno de uma Terra também em rotação, porém em torno de seu eixo, de oeste para leste, e diariamente. Registre-se que esse modelo foi defendido pelo erudito inglês Alcuino de York (735-804) e, também, pelo astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601) que, ao não observar a paralaxe estelar, rejeitou o **heliocentrismo**, por contradizer a **Bíblia** e, em 1574, apresentou seu próprio modelo: – *Terra parada e girando em torno dela estavam a esfera das estrelas fixas, a Lua e os Sol; este, por sua vez, carregava em torno de si os demais planetas.*

1.4.2. Modelo de Copérnico

Muito embora o **heliocentrismo** tenha sido considerado pelo astrônomo grego Aristarco de Samos (c.320-c.250), por volta de 290 a.C., sua formulação só foi proposta, com o “rigor matemático” da época, no Século 15. Com efeito, em 1440, como vimos acima, o Cardeal Nicolau de Cusa publicou o **De Docta Ignorantia**, no qual afirmou que a Terra girava em torno de seu eixo e em torno do Sol, que o Universo era infinito, e que as estrelas eram outros sóis com planetas habitados. Ainda nesse livro, Nicolau de Cusa propôs uma ideia revolucionária (registrada anteriormente), hoje conhecida como **Princípio Cosmológico**, segundo o qual o observador verá o Universo girar em torno de si próprio, em qualquer parte que esteja no mesmo, isto é: no Sol, na Terra, na Lua, em qualquer planeta ou mesmo estrela.

O astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) apresentou suas primeiras ideias do **heliocentrismo** em um manuscrito, provavelmente escrito em 1510, intitulado **Commentariolus** (“Pequeno Comentário”), que foi traduzido e comentado pelo físico e historiador da ciência, o brasileiro Roberto de Andrade Martins (n.1950), em 1990 [**Nicolau Copérnico: Commentariolos** (Nova Stella e Museu de Astronomia, 1990)]. É oportuno observar que esse livro circulou apenas entre seus alunos e amigos, dentre os quais se encontrava o matemático e astrônomo austríaco Georg Joachim von Lauchen (Rheticus/Rético) (1514-1576). Nesse livro, ao analisar o **Modelo Geocêntrico de Ptolomeu**, Copérnico criticou o conceito do **equante**, pois o mesmo entrava em conflito com “a regra do movimento absoluto” segundo a qual tudo deveria se mover em movimento uniforme de rotação em torno do centro

do mundo que está perto do Sol. Ora, isso não acontecia no **modelo ptolomaico**, pois neste os planetas giravam também em órbitas circulares, mas a rotação era uniforme em relação a um ponto que não coincidia com o centro da circunferência. Portanto, concluiu Copérnico, o **equante** situava-se próximo da Terra.

É interessante destacar que, em 1525, o médico francês Juan Fresnel (1497-1558) determinou o raio terrestre (RT) medindo a distância entre Paris e Amiens acoplado um contador de voltas às rodas de sua carruagem. Em 1536, o poeta italiano Marcellus Stellatus Palingenius (Pier Angelo Manzolli/Marcello Stellato) (c.1500-c.1551) afirmou em um de seus poemas épicos filosóficos de nome **Zodiacus Vitae**, que o Universo era infinito. Essa obra, escrita em latim, é composta de 12 livros, um para cada signo do zodíaco. Em 1559, o Papa Paulo IV (Giovanni Pietro Carafa) (1476-1559) promulgou o primeiro *Index Librorum Prohibitorum* (“Índice de Livros Proibidos”), no qual incluiu o **Zodiacus Vitae**.

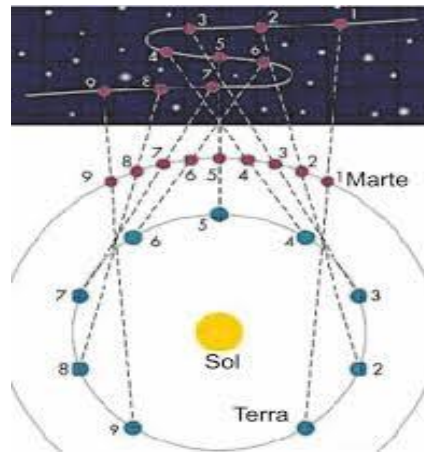
Em 1543, estimulado por Rheticus, Copérnico publicou seu famoso livro **De Revolutionibus Orbium Coelestium** (“Das Revoluções dos Corpos Celestes”) [**On the Revolutions of the Heavenly Spheres (Great Books, 15)** (Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1993)], no qual apresentou os seguintes postulados que caracterizavam seu **modelo planetário heliocêntrico**: 1) *O princípio metafísico básico era o da perfeição do movimento circular*; 2) *O centro da Terra não era o centro do Universo, e sim, apenas o centro da esfera lunar*; 3) *O centro do mundo era perto do Sol*; 4) *É a Terra e não a esfera das estrelas fixas que gira em torno de seu eixo, cada 24 horas*; 5) *A distância Terra-Sol é muito menor do que a distância Sol-Estrelas Fixas*

Observe-se que foi Rheticus/Rético quem ficou encarregado da impressão desse livro, sendo o clérigo alemão Andréas Osiander (1498-1552) o responsável pela sua supervisão técnica. No Prefácio (não assinado e mais tarde descoberto ser de autoria de Osiander) era expresso o ponto de vista de que as hipóteses apresentadas no livro não eram necessariamente verdadeiras e que nem sequer se exigia que fossem provadas. Os leitores de Copérnico pensaram que o Prefácio fora escrito por ele para evitar a oposição religiosa. Talvez fosse essa a real intenção de Osiander já que, antes mesmo do livro ser publicado, o clérigo alemão Martinho Lutero (1483-1546) – idealizador da *Reforma Protestante* – afirmava: - *O louco vai virar toda a ciência da Astronomia de cabeça para baixo. Mas, como declara o Livro Sagrado, foi ao Sol e não à Terra que Josué mandou parar*. O livro de Copérnico foi às suas mãos em 24 de maio

de 1543, dia de sua morte. Ele, contudo, já havia perdido a memória e suas faculdades mentais.

Note-se que Rhaeticus/Rético introduziu uma mudança conceitual do **seno**, ao considerar que para um arco OAD, o segmento AB (perpendicular baixada de A ao raio OD) representa o **seno** do ângulo AÔB do triângulo OAB. Contudo, ele ainda, como os gregos, hindus e árabes, preparou uma **tabela de senos** baseada em raios de várias unidades: 10^{10} e 10^{15} , e para cada dez segundos ($10''$) de arco.

O **Modelo Planetário de Copérnico** explicou naturalmente o **movimento retrógrado** dos planetas como sendo devido às velocidades dos mesmos em relação ao nosso planeta Terra. Assim, a razão de a retrogradação de Mercúrio e de Vênus só ocorrer quando estão em conjunção deve-se a sua maior velocidade; e a razão da retrogradação de Marte, Júpiter e Saturno só ocorrer em oposição, deve-se à menor velocidade deles, também em relação ao nosso planeta Terra. Além dessa explicação, Copérnico determinou a escala do sistema solar, em Unidade Astronômica (UA) (usando o valor calculado por Aristarco), ou seja, a distância Terra-Sol: Mercúrio $\sim 0,3763$ UA; Vênus $\sim 0,7193$ UA; Marte $\sim 1,5198$ UA; Júpiter $\sim 5,2192$ UA; e Saturno $\sim 9,1743$ UA. Note-se que Copérnico teve, também, de usar 48 epiciclos para explicar as diversas observações sobre os movimentos dos planetas e da própria Terra, por haver considerado que os planetas descreviam apenas movimentos circulares uniformes em torno do Sol. Também usando seu modelo, Copérnico fez uma revisão no catálogo estelar de Ptolomeu, calculou e interpretou a **precessão dos equinócios** como sendo devido a uma pequena oscilação do eixo da Terra, estimou os volumes relativos da Lua, Terra e Sol como sendo de 1:43:6937. Por outro lado, para justificar a razão de não observação de qualquer paralaxe (deslocamento aparente de uma estrela no céu em virtude de duas observações, da mesma, em lugares diferentes) anual das estrelas fixas, Copérnico usava seu quinto postulado, e a deficiência dos instrumentos astronômicos para medi-la. Ele foi aristotélico ao afirmar que um corpo lançado (a partir da superfície terrestre) verticalmente para cima não cairia a oeste de sua posição inicial, em razão de o ar ser arrastado pela Terra em seu movimento orbital solar (*Google Imagens*).



Depois de ser apresentado o **Modelo de Copérnico**, este passou a ser usado, bem como melhorado por intermédio de novos equipamentos de observação. Por exemplo, em 1551, o matemático alemão Erasmus Reinhold (1511-1553) publicou, com base naquele modelo, novas tabelas astronômicas – as conhecidas **tabelas prutênicas (prussianas)** – melhorando bastante as **tabelas alfonsinas**. Em 1553, o matemático inglês Leonhard Digges [c.1515 (c.1520)-c.1559] publicou o livro **A General Prognostication** (“Um Prognóstico Geral”) contendo um calendário perpétuo e informações sobre o clima. Esse livro foi revisado por ele em 1555 e 1556, respectivamente com os nomes de: **A Prognostication of Right Good Effect** (“Um Prognóstico de Efeitos Saudáveis”) e **A Prognostication Everlasting** (“Um Prognóstico Eterno”). Por sua vez, o matemático e médico inglês Robert Recorde (1510-1558), em seu livro **The Whetstone of Witte** (“O Castelo do Conhecimento”), publicado em 1557 [no qual inventou o símbolo de igualdade (=)], se manifestou favoravelmente ao copernicanismo. A mesma manifestação foi apresentada pelo físico e filósofo italiano Giambattista Della Porta (c.1535-1615), em sua célebre obra **Magia Naturallis** (“Magia Natural”), editado em 1558. Registre-se que foi nesse livro que ele chegou a descrever um equipamento constituído de duas lentes para observação estelar. Era a primeira ideia sobre o que seria, no Século 17, o revolucionário **telescópio**, referido acima.

Ainda no Século 16, novas contribuições foram adicionadas ao conhecimento do Universo. Assim, em 1572, o matemático, militar e engenheiro inglês Thomas Digges (c.1546-1595) [filho de Leonhard e aluno do matemático inglês John Dee (1527-c.1609)] observou um novo fenômeno nos céus, qual seja, o aparecimento de uma “nova estrela”, registrada por ele no livro escrito, em 1573, o **Alae seu Scalar**

Mathematicae (“As Asas ou Aferidores Matemáticos”), no qual explicou sua observação na base do modelo de Copérnico, usando para isso seus conhecimentos de Matemática, principalmente de Trigonometria e que poderiam ajudar na determinação da paralaxe dessa “nova estrela”. Note-se que, em 1571, Thomas escreveu o livro de nome **Pantometria** no qual completou os trabalhos de seu pai e, também, incluiu observações astronômicas precisas, que fizera com Dee. Muito embora não haja evidências de que teriam usado um **telescópio**, nesse livro, contudo, há a descrição de um aparelho que permitia desenhar serviços de agrimensura (levantamentos topográficos e traçados de curvas de nível), uma espécie de **teodolito**. Registre-se que, em 1576, reeditou o livro de seu pai e adicionou um apêndice intitulado **Perfit Description of the Caelestiall Orbes** (“Perfeita Descrição das Órbitas Celestes”) contendo um diagrama do Universo tendo o Sol como seu centro e os planetas, inclusive a Terra, giravam em torno dele. Além disso, considerava o Universo como infinito, sendo as estrelas espalhadas nesse espaço infinito e não mais presas à esfera celeste, conforme indicava Copérnico em seu livro, que fora parcialmente traduzido por ele.

Em 11 de novembro de 1572, Tycho Brahe (assim como astrônomos chineses e coreanos) observaram na constelação de Cassiopéia, uma nova estrela tão brilhante quanto Vênus, visível de dia e por um período de 16 meses. Em 1574, Tycho Brahe registrou essa descoberta no livro intitulado **De Stella Nova** (“A Estrela Nova”), que decorreu de suas próprias observações comparando-as com as realizadas por Thomas Digges. Essa **nova** (como ficaram conhecidos, a partir daí, novos eventos celestes) se encontrava muito além da Lua e, desse modo, essa observação rompeu com a tradição aristotélica, segundo a qual esse “novo objeto celeste” deveria situar-se na esfera sublunar, pois o céu era imutável (incorruptível). Registre-se que foi nesse livro que Tycho propôs seu **modelo geoheliocentro**, já referido.

O conhecimento dos céus foi grandemente melhorado com a iniciativa do Rei da Dinamarca e da Noruega, Frederico II (1534-1588) ao construir e instalar, em 1576, o **Observatório Uraniborg** (“castelo dos céus”), localizado na então ilha de Hveen (hoje: Ven), distante 30 km de Copenhague. Esse observatório, dirigido por Tycho Brahe, foi dotado dos melhores instrumentos ópticos até então conhecidos, sendo alguns deles construídos pelo próprio Tycho. Com tais instrumentos, ele registrou com uma grande precisão, a posição de 777 estrelas, bem como as posições dos planetas conhecidos desde a Antiguidade. Em 1577, Tycho observou um brilhante cometa e, ao realizar cálculos sobre o seu movimento,

chegou à conclusão de que o mesmo estava muito além da Lua e muito mais longe do que Vênus, o que demonstrava ser ele um verdadeiro objeto celeste e não um fenômeno meteorológico formado de vapores quentes ou secos, retirados do ar (o que, segundo os aristotélicos, eram causadores de doenças endêmicas). Observou ainda Brahe que a extremidade de sua cauda sempre apontava em sentido oposto ao do Sol, devido à ação dos raios solares. Observe-se que, com a morte de Frederico II, em 1588, assumiu o trono o seu filho (?) que, contudo, não aceitando o modo como Tycho administrava a ilha de Hveen, pois usava todos os recursos para manutenção dessa ilha em prol do *Uraniborg*, demitiu-o.

Ainda na segunda metade do Século 16, a Trigonometria recebeu uma nova contribuição. Com efeito, em 1579, o advogado e matemático francês François Viète (1540-1603) em seu livro **Canon Mathematicus** (“A Medida da Matemática”) apresentou a demonstração da **lei das tangentes** (triângulo plano com ângulos A, B, C e os respectivos lados opostos a, b, c): $(a - b)/(a + b) = [\operatorname{tg} (1/2)(A - B)]/\operatorname{tg} [(1/2)(A + B)]$. Por outro lado, demonstrou que: $\operatorname{sen} A - \operatorname{sen} B = 2 \cos [(A + B)/2] \times \operatorname{sen} [(A - B)/2]$ e obteve as identidades para $\operatorname{sen} (n\theta)$ e $\operatorname{cos} (n\theta)$, em função de $\operatorname{sen} (\theta)$ e $\operatorname{cos} (\theta)$, porém, estas só ficaram conhecidas quando seu livro **Sectiones Angulares** (“Secções Angulares”), postumamente publicado, em 1615.

É oportuno destacar que o **heliocentrismo** e a **pluralidade dos mundos** foram defendidos pelo filósofo e teólogo italiano Giordano Bruno (1548-1600), em seus livros **De la Causa, Principio e Uno** (“A Causa, o Princípio e o Uno”) [A Causa, o Princípio e o Uno (Nova Stella/Instituto Cultural Ítalo-Brasileiro, 1988)] e **De l’Infinito Universo i Mondi** (“Do Universo Infinito e dos Mundos”), ambos escritos em 1584. Por causa da defesa ardorosa dessas ideias, Bruno foi excomungado e queimado vivo pela *Santa Inquisição*, em 17 de fevereiro de 1600.

1.4.3. Modelo de Kepler

Em 1595, o astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630) procurava uma demonstração matemática para o **Modelo de Copérnico** (de 1543), desde que o aprendera com o também astrônomo alemão Michael Maestlin (1550-1631). Assim, em 09 de julho de 1595, ao situar um triângulo entre dois círculos, percebeu que a razão entre os raios desses círculos era a mesma entre os das órbitas de Júpiter e Saturno. Em

vista deste resultado, tentou inscrever outras figuras geométricas planas entre as órbitas dos planetas. Como tal modelo não se enquadrou no de Copérnico, Kepler partiu então para os sólidos regulares pitagóricos-platônicos: tetraedro (4 faces), hexaedro (cubo: 6 faces), octaedro (8 faces), dodecaedro (12 faces) e icosaedro (20 faces). Inicialmente, inscreveu entre as esferas dos planetas apenas o cubo. No entanto, ao comparar a relação entre os raios dessas esferas e as distâncias das órbitas dos planetas dadas pelo **Modelo de Copérnico**, verificou que havia uma grande discrepância. Em seguida, fez uma nova tentativa, deixando o cubo entre as esferas de Júpiter e Saturno e os cubos entre as esferas de Marte e Terra, Terra e Vênus, Vênus e Mercúrio foram substituídos, respectivamente, pelo dodecaedro, icosaedro e octaedro. Relacionado agora os raios dessas esferas com as distâncias planetárias copernicanas, verificou que a discrepância diminuía, à exceção de Mercúrio, cuja esfera tangenciando o octaedro não explicava seus movimentos. Desse modo, teve que apelar para um artifício [“pequena fraude”, segundo Koestler (op. cit.)], qual seja, o de inscrever a esfera correspondente a Mercúrio no quadrado formado pelas quatro arestas medianas do octaedro. Em vista desse sucesso parcial, Kepler continuou melhorando seu modelo matemático cada vez mais. Assim, substituiu cada esfera por duas outras, onde o raio da menor era a menor distância do planeta ao Sol e o raio maior, conseqüentemente, a maior distância orbital.

Logo em 1596, Kepler apresentou suas primeiras ideias sobre seu modelo planetário em um livro intitulado **Mysterium Cosmographicum** (“Mistério Cosmográfico”) [**Epitome of Copernican Astronomy: IV-V/The Harmonies of the World: V (Great Books, 15)** (Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1993)]. Ao receber esse livro das próprias mãos de Kepler, Tycho Brahe convidou-o para trabalhar em Praga e lá chegou, em janeiro de 1600. Com a morte de Tycho, em 1601, Kepler foi designado, em 1602, **matemático imperial** em seu lugar. Quando ainda vivo, Tycho Brahe confiou a Kepler o cálculo da órbita de Marte, tendo em vista as observações que fizera sobre o movimento desse planeta. Ao observar que a velocidade orbital de Marte era variável (mais rápido próximo do Sol e mais lento longe do Sol), Kepler formulou, em 1602, sua famosa **Lei das Áreas**: - *O raio vetor ligando um planeta ao Sol, descreve áreas iguais em tempos iguais.*

Ao analisar atentamente as observações que Tycho Brahe fizera do planeta Marte, Kepler pensou que em poucas semanas encontraria a forma de sua órbita. Como também observou que a velocidade de Marte era variável, conforme vimos acima, e que sua órbita apresentava uma

pequena excentricidade, Kepler fez cerca de setenta tentativas com o objetivo de enquadrar as observações de Tycho nos modelos de Copérnico e do próprio Tycho. Assim, inicialmente, considerou que cada esfera característica de um planeta (Marte, em particular) era na realidade uma carapaça esférica de espessura suficiente que pudesse explicar a excentricidade de Marte referida antes. Posteriormente, considerou uma série de combinações de círculos para a órbita marciana. No entanto, como encontrou uma diferença de 8 minutos de arco (8') e achando que seu mestre Tycho não cometeria tal erro, Kepler passou a considerar órbitas ovaladas até chegar à forma elíptica. Desse modo, em 1609, Kepler propôs sua **Lei das Órbitas**: - *Os planetas se deslocam em torno do Sol em órbitas elípticas, tendo o Sol como um dos focos.*

É interessante destacar que essa lei (assim como a lei de 1602), foi apresentada no livro, publicado em 1609, **Astronomia Nova** ("Nova Astronomia"), no Capítulo intitulado **Comentários sobre os Movimentos de Marte**. Destaque-se, também, que a ideia de órbitas planetárias elípticas já havia sido considerada por Arzaquel de Toledo (1029-1087), no Século 11 [Bernal, J. D. **Historia Social de la Ciência I, II** (Ediciones Península, 1968)].

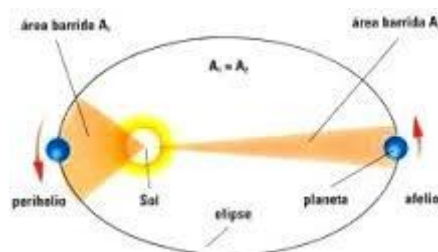
Havendo descoberto as leis que regem o movimento (cinemática) dos planetas, partiu Kepler para determinar a relação entre as distâncias e os períodos dos mesmos. Depois de fazer algumas tentativas relacionando potências das distâncias e dos períodos planetários, chegou finalmente à sua terceira lei, a **Lei dos Períodos**: - *A relação entre o quadrado do período de revolução dos planetas e o cubo de sua distância média ao Sol é uma constante.*

Acreditando que os planetas em suas órbitas entoam verdadeiros cantos musicais, Kepler denominou-a de **lei harmônica**, e apresentou-a em seu tratado intitulado **Harmonice Mundi** ("A Harmonia do Mundo"), composto de cinco livros e editado em 1619.

Depois de entender a **cinemática** do sistema planetário por intermédio de suas três leis (1602, 1609, 1619), Kepler tentou entender a sua **dinâmica** (força gravitacional). Assim, influenciado pelo físico inglês William Gilbert (1544-1603), que havia mostrado no livro **De Magnete**, de 1600, ser a Terra um imenso ímã (também nesse livro Gilbert defendeu a infinitude do Universo), Kepler supôs que o Sol exercia uma influência magnética sobre os planetas, a chamada **anima motrix**. Como a função dessa força magnética é mover os planetas e como estes se situam na eclíptica (trajetória aparente do Sol entre as estrelas), Kepler admitiu que a **força solar** não agia em todas as direções e sim, apenas, na direção do raio eclíptico, e que a mesma era proporcional ao inverso da distância.

Essas ideias foram apresentadas por Kepler em seus livros **Epitome Astronomiae Copernicanae, Liv IV. Physica Coelestis** (“Epítome de Astronomia Copérnica, Livro IV. Física Celeste”), em 1620, e **Epitome Astronomiae Copernicanae, Liv V, VI, VII. Doctrina Theorica** (“Epítome de Astronomia Copérnica, Livros V, VI, VII. Doutrina Teórica”), em 1621 [Évora, F. R. R. 1988, (op. cit.); Mourão, R. R. F. **Kepler: A Descoberta das Leis do Movimento Planetário** (Odysseus, 2003); Hawking, S. **Os Gênios da Ciência: Sobre os Ombros de Gigantes** (Campus/Elsevier, 2005); Gleiser, M. **A Harmonia do Mundo** (Romance) (Companhia das Letras, 2006)].

É interessante registrar que o **heliocentrismo** foi defendido pelo físico e astrônomo italiano Galileu Galilei (1564-1642) em seu livro **Il Saggiatore** (“O Ensaíador”), publicado em 1623, e dedicado ao seu amigo Cardeal Maffeo Barberini (1568-1644), que acabara de ser eleito Papa com o nome de Urbano VIII. Aliás, é nesse livro que Galileu enunciou sua célebre frase: - *A Matemática é a Linguagem da Natureza*. Registre-se, também, que a defesa do **heliocentrismo** foi novamente apresentada e justificada por Galileu em seu famoso livro **Dialogo supra i due Massimi Sistemi del Mundo Tolemaico e Copernicano** (“Diálogo sobre os dois Principais Sistemas do Mundo, o Ptolomaico e o Copernicano”), publicado em 1632 [**Diálogo sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico-Copernicano** (Discurso Editorial/FAPESP, 2001)], que o levou a ser processado pela *Santa Inquisição*, em 1633. Contudo, nesse livro, ele não trata do **Modelo de Kepler** (Google Imagens).



Por fim, o físico e matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783) no tratado chamado **Introductio in Analysin Infinitorum** (“Introdução à Análise do Infinito”), de 1748, introduziu os **senos** e **tangentes** sem dimensões, ou seja, ele considerou o raio da circunferência como unitário.

É importante notar que Euler, em trabalhos realizados em 1734-1735 e publicados em 1740, reobteve a fórmula deduzida pelo matemático francês Abraham de Moivre (1667-1754), em 1707, qual seja:

$$(\cos x + \sqrt{-1} \operatorname{sen} x)^n = \cos (nx) + \sqrt{-1} \operatorname{sen} (nx).$$

Mais tarde, Euler publicou os livros **Institutiones Calculi Differentialis** (“Livros sobre o Cálculo Diferencial”), publicada em Berlim, em 1755, e **Institutiones Calculi Integralis** (“Livros sobre o Cálculo Integral”), obra em três volumes, publicada em São Petersburgo, de 1768 a 1770, nos quais conceituou a noção de **função** – denotada por $f(x)$ – e encontrou a relação entre as **funções trigonométricas** e as **funções exponenciais**, por intermédio da hoje famosa **equação de Euler**:

$$\exp (\pm i x) = \cos (x) \pm i \operatorname{sen} (x),$$

onde $i = \sqrt{-1}$. Para isso, Euler usou as representações em série, obtidas a partir da famosa **Fórmula de Taylor**, encontrada pelo matemático inglês Brook Taylor (1685-1731), no livro intitulado **Methodus Incrementorum Directa et Inversa** (“Métodos Direto e Inverso de Incrementações”), publicado em 1715. Desse modo, Euler escreveu:

$$e^x = \sum_{k=0}^{\infty} x^k / k!; \operatorname{sen} x = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k x^{2k+1} / (2k+1)!; \cos x = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k x^{2k} / (2k)!.$$

Registre-se que a notação $i = \sqrt{-1}$ foi inventada por Euler, em 1777, no manuscrito intitulado **De Formulis Differentialis Angularibus** (“Das Fórmulas Diferenciáveis Angulares”), uma vez que o símbolo i era usado para denotar “número infinito”, como se pode ver na expressão, que Euler utilizara antes:

$$e^x = (1 + x/i)^i,$$

e que significava (na notação de hoje):

$$e^x = \lim_{h \rightarrow \infty} (1 + x/h)^h.$$

1.5. Primeiros Universos Cosmológicos

Muito embora a **Mecânica Celeste**, baseada na **Teoria da Gravitação** formulada pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) e publicada em 1687 [**PRINCIPIA: Princípios Matemáticos da Filosofia Natural** (Nova Stella/EDUSP, 1990)], tenha contribuído para o desenvolvimento da Astronomia ela, no entanto, apresentava duas questões inquietantes, quais sejam: 1ª) não conseguia explicar o **avanço (precessão) do periélio de Mercúrio**, 43 segundos de arco (43") por século, medido pelo astrônomo francês Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1887), em 1859; 2ª) a confirmação do cálculo do desvio ("bending") sofrido pela luz ao passar pelo Sol. Esse desvio (0",85) foi calculado (sem publicação), em 1786, pelo físico e químico inglês Lord Henry Cavendish (1731-1810), e confirmado pelo astrônomo alemão Johann George von Soldner (1776-1833), em 1804. Registre-se que o próprio Newton questionara esse desvio em seu livro **Optics** ("Ótica"), publicado em 1704. Observe-se que essas questões só foram respondidas pela **Cosmologia Relativística**. Vejamos como.

Em 1915 (*Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch Physikalische Klasse* **1**, p. 395), independentemente, os alemães, o matemático David Hilbert (1862-1943) e o físico Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) (naturalizado norte-americano) (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **2**, p. 778; 799; 831; 844) formularam a hoje célebre **Teoria da Relatividade Geral** (TRG) traduzida pela **Equação de Einstein** (EE): $R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R \equiv G_{\mu\nu} = -K T_{\mu\nu}$, onde $R_{\mu\nu}$ é o **tensor geométrico de Ricci** [que é o **tensor de Riemann** ($R_{\mu\nu\gamma\tau}$) contraído], $g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu}$ é o **tensor métrico riemanniano**, $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$, $G_{\mu\nu}$ é o **tensor de Einstein**, $K = 8\pi G/c^4$ é a **constante gravitacional de Einstein**, G é a **constante de gravitação universal de Newton-Cavendish**, c é a **velocidade da luz no vácuo**, $T_{\mu\nu}$ é o **tensor energia-matéria**, e $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ (ou $1, 2, 3, 4$).

Logo depois, em 1916 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **1**, p. 189; 424), o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) encontrou uma solução rigorosa para essa equação einsteiniana, ao considerar uma carga puntiforme colocada em um campo gravitacional isotrópico e estático. Essa solução ficou mundialmente conhecida como a **Métrica de Schwarzschild**. Em 1917 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **1**, p. 142), Einstein encontrou uma solução para a sua equação que, no entanto, diferentemente da solução encontrada por Schwarzschild, era dinâmica. Contudo, por essa época, não havia nenhuma evidência experimental sobre a dinâmica do Universo, isto é, se o seu raio dependia do tempo. Então, para contornar

essa dificuldade, ele formulou a hipótese de que as forças entre as galáxias eram independentes de suas massas e que variavam na razão direta da distância entre elas, isto é, havia uma “**repulsão cósmica**”, além, é claro, da “**atração gravitacional Newtoniana**”. Matematicamente, essa hipótese significava acrescentar um termo ao primeiro membro de sua equação – o famoso **termo cosmológico** ou **termo de repulsão cósmica** ($\Lambda g_{\mu\nu}$). Desse modo, Einstein postulou que o Universo era estático e, usando sua equação, demonstrou ser o mesmo finito e de curvatura riemanniana positiva ou esférica. Em virtude disso, o seu modelo cosmológico ficou conhecido como o **Universo Cosmológico Cilíndrico de Einstein** (UCCdE), em que o espaço é curvo, porém o tempo é retilíneo.

Ainda em 1917 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **78**, p. 3; 341; *Koninklijke Akademie von Wetenschappen te Amsterdam Proceedings* **19**, p. 1217; **20**, p. 229), o astrônomo holandês Willem de Sitter (1872-1934) encontrou outra solução estática da equação einsteniana com o **termo cosmológico** $\Lambda g_{\mu\nu}$, ao considerar o Universo homogêneo e uniforme, porém vazio, ou seja: $T_{\mu\nu} = 0$. No entanto, essa solução apresentava duas consequências notáveis: o **espaço geométrico** possuía uma estrutura que era *independente da matéria contida nele*; e o **tempo** era relativo, isto é, dependia do lugar, ao contrário do que acontecia com o UCCdE em que o **tempo cósmico t** independe do lugar. Por essa razão, esse modelo cosmológico ficou conhecido como o **Universo Cosmológico Esférico de Sitter** (UCEdS), uma vez que nele o espaço-tempo é curvo.

1.6. A Expansão do Universo

A primeira solução não-estática da EE foi obtida pelo matemático russo Aleksandr Aleksandrovich Friedmann (1888-1925) ao perceber que a consideração do termo cosmológico (caracterizado por Λ) por parte de Einstein introduzia infinitos em sua equação, uma vez que, em certas situações, esse termo poderia ser nulo e Einstein havia dividido sua equação por esse mesmo termo. Em vista disso, Friedmann resolveu a EE sem o termo cosmológico ($\Lambda = 0$) e, ao assumir a hipótese de que a matéria homogênea do Universo se distribuía isotropicamente no espaço, encontrou duas soluções não-estáticas: em uma delas o Universo se expandia com o tempo e, na outra, se contraía. Esse resultado foi apresentado por ele em 1922 (*Zeitschrift für Physik* **10**, p. 377).

Portanto, a possibilidade teórica de um **Universo Cosmológico em Expansão** (UCE) prevista por Friedmann, começou a se tornar

realidade devido aos trabalhos realizados pelo astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953). Com efeito, em dezembro de 1924, trabalhando com o novo telescópio *Hooker* do *Observatório de Monte Wilson*, Hubble estava examinando uma fotografia da **nebulosa (galáxia) de Andrômeda** (M31) [M, do catálogo preparado pelo astrônomo francês Charles Messier (1730-1817), em 1771]. Nesse exame, encontrou uma estrela do mesmo tipo existente em nossa nebulosa (galáxia), a **Via Láctea**. Continuando a estudar as nebulosas fora de nossa Galáxia, chegou a seguinte conclusão: - *As galáxias são distribuídas no espaço de modo homogêneo e isotrópico*. Assim, pela primeira vez, a uniformidade do Universo não era colocada **a priori**, ela provinha de uma observação. Essas observações de Hubble foram publicadas em 1925 (*Astrophysical Journal* **62**, p. 409; *Publications of the American Astronomical Society* **5**, p. 261) e em 1926 (*Astrophysical Journal* **63**, p. 236; **64**, p. 321).

Em vista das observações de Hubble sobre a expansão do Universo, em 1927 (*Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* **A47**, p. 49), o astrônomo belga, o Abade Georges-Henri Edouard Lemaître (1894-1966) formulou um modelo cosmológico no qual buscou uma solução intermediária que permitisse uma transição entre os **Universos Cosmológicos de Einstein-de Sitter** (ambos de 1917), ao considerar $\Lambda = \Lambda_c$, sendo Λ_c um valor crítico que corresponde a uma posição inicial de equilíbrio do UCCdE e que, ao ser rompido, o mundo caminharia através de uma série contínua de estados intermediários, até o UCedS. Assim, segundo Lemaître, o Universo teria começado a partir da explosão de um **átomo primordial** ou **ovo cósmico** que conteria toda a matéria do Universo. Este modelo ficou conhecido como o **Universo Cosmológico de Lemaître** (UCdL) [Lemaître, G. **L'Hypothèse de l'Atome Primitif** (Neuchâtel, Griffon, 1946)].

Na continuação de suas observações, Hubble fez, em 1929 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* **15**, p. 169), outra grande descoberta. Com efeito, ao observar cerca de 18 galáxias próximas de nossa Galáxia, percebeu que havia no espectro das mesmas um deslocamento para o vermelho (*red shift*). Interpretado esse deslocamento como devido ao **Efeito Doppler** (1842)-**Fizeau** (1848) [variação da frequência de uma onda (sonora ou luminosa) com a velocidade da fonte que a produz e do observador], o mesmo significava uma fuga das galáxias, em relação ao observador. Ao calcular a distância entre as várias galáxias, concluiu que (logo conhecida como **Lei de**

Hubble): - As galáxias se afastam uma das outras com uma velocidade (V) proporcional à distância (D) que as separam: $V = H_0 D$ (em notação atual).

Ainda nessa ocasião, Hubble estimou que: $H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc} \approx 0.5 \times 10^{-9}$ anos. Como o inverso de H_0 determina a idade do Universo, esse valor obtido por Hubble indicava ser de aproximadamente 2 bilhões de anos a idade do mundo. É oportuno destacar que, em suas observações, Hubble foi auxiliado pelo astrônomo norte-americano Milton La Salle Humason (1891-1972) que, antes de se tornar astrônomo, era mensageiro do *Hotel Monte Wilson*, que fornecia hospedagem para os astrônomos que visitavam o *Observatório de Monte Wilson* e, depois foi nomeado condutor de mulas desse Observatório. Como Hubble e Humason determinaram, em 1934 (*Astrophysical Journal* **74**, p. 43), que $H_0 \approx 550 \text{ km/s/Mpc}$, a **Lei de Hubble** passou a ser também conhecida como a **Lei de Hubble-Humason** e H_0 como a **Constante de Hubble-Humason**. Note que $1 \text{ pc} = 3.0857 \times 10^{18} \text{ cm}$ e que $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$ [Singh, S. **Big Bang** (Record, 2006); Daminieli, A. **Hubble: A Expansão do Universo** (Odysseus, 2003)].

O *Universo Cosmológico Expansivo de Friedman-Lemaître* (UCEF-L) foi sintetizado pelo astrônomo norte-americano Howard Percy Robertson (1903-1961), em 1935 (*Astrophysical Journal* **82**, p. 284) e 1936 (*Astrophysical Journal* **83**, p. 187; 257) e, independentemente, pelo matemático inglês Arthur Geoffrey Walker (1909-2001), também em 1936 [*Proceedings of the London Mathematics Society Series* **2** (42), p. 90], ao apresentarem a famosa **Métrica de Robertson-Walker**. Desse modo, aquele modelo, dotado dessa métrica, indicava que o Universo havia começado pela explosão do “ovo cósmico lemaîtreano”. Em vista disso, algumas questões foram então colocadas, principalmente a que se refere ao instante dessa explosão, bem como, a partir daí, como se formaram as galáxias do Universo, que ora contemplamos, com seus principais constituintes que são as estrelas. É oportuno registrar que, em 1949, o matemático austro-húngaro Kurt Gödel (1906-1978) apresentou uma nova solução da EE na qual o Universo é infinito, sem tempo cósmico, estático (sem expansão) e giratório. Nesse *Universo Cosmológico de Gödel* (UCG), ... *um foguete pode viajar para qualquer região do passado, presente ou futuro e voltar atrás* ... [Gödel, K. **IN**: Paul Arthur Schilpp (Editor), **Albert Einstein: Philosopher-Scientist** (Open Court, 1970)].

1.7. Big Bang, Nucleossíntese e a Radiação Cósmica de Fundo

Os **Universos Cosmológicos Expansivos**, propostos nas décadas de 1920 e 1930, foram analisados pelo físico russo-norte-americano

George Antonovich Gamow (1904-1968) (ex-aluno de Friedmann). Com efeito, partindo da ideia da explosão inicial do Universo, apoiando-se na *EE* (1915) e nas Leis da Termodinâmica (1845), Gamow passou a elaborar o seu modelo cosmológico. Assim, em 1946 (*Physical Review* **70**, p. 572), considerou que nos primeiros momentos, o Universo era bastante denso e muito quente, ocasionando rápidas reações termonucleares. Em 1948 (*Physical Review* **73**, p. 803), em colaboração com seu aluno, o físico norte-americano Ralph Asher Alpher (1921-2007), Gamow apresentou o seu famoso artigo no qual o “ovo cósmico lemaîtreiano” formado de nêutrons, no instante do **big bang** [nome cunhado, pejorativamente, pelo astrofísico inglês Sir Fred Hoyle (1915-2001), no último programa de rádio de uma série intitulada **The Nature of Things** que apresentou na *British Broadcasting Corporation* (BBC), em 1950], se desintegrou em prótons e elétrons. Ao serem formados esses prótons, alguns colidiram com nêutrons que ainda persistiam e, gradualmente, iam formando núcleos mais pesados da Tabela Periódica, num processo que ficou conhecido como **nucleossíntese**. É oportuno destacar que esse artigo também ficou famoso pelo senso de humor de Gamow, uma vez que persuadiu o físico germano-norte-americano Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) para também assiná-lo, com o objetivo de formar as três primeiras letras do alfabeto grego [alfa (α) (Alpher), beta (β) (Bethe) e gama (γ) (Gamow)], que combinavam bem com o propósito do artigo que era o de descrever o início do Universo! Em vista disso, esse modelo cosmológico ficou conhecido como **Universo Cosmológico Alfa-Beta-Gama** ($\alpha\beta\gamma$) ou **modelo $\alpha\beta\gamma$** .

Nesse **modelo**, seus autores fizeram a notável previsão de que a radiação (sob a forma de fótons) do início do **big bang** (BB) ainda deveria estar presente, com a única diferença que a temperatura inicial do Universo, agora, deveria apresentar um valor extremamente baixo, cerca de 25 K. Note-se que, antes, em 1946, o físico norte-americano Robert Henry Dicke (1916-1997), chefiando uma equipe do *Laboratório de Radiação* do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), encontrara o valor de 20 K, como limite superior para a temperatura de qualquer **Radiação Cósmica de Fundo de Microonda** – RCFM/CMB) extraterrestre e isotrópica. Nessa equipe, faziam parte os físicos norte-americanos Phillip James Edwin Peebles (n.1935), Peter Guy Roll e David Todd Wilkinson (1935-2002). Registre que, em 1948 (*Nature* **162**, p. 774), Alpher e o físico norte-americano Robert C. Herman (1922-1997) (também colaborador de Gamow), encontraram para a RCFM um valor de ~ 5 K. Em 1953 (*Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*, 39), Gamow encontrou um

novo valor para a radiação de fundo, qual seja, o de aproximadamente 7 K.

A teoria da **Nucleossíntese** elaborada por Gamow e seus discípulos, conforme vimos acima, apresentava uma grande dificuldade, qual seja, a explicação de como o hélio (${}^4\text{He}$) se convertera nos outros elementos químicos pesados nos momentos iniciais do BB. Em seus trabalhos, eles mostraram que o acréscimo do núcleo do hidrogênio (${}^1\text{H}$) ao núcleo do ${}^4\text{He}$ (partícula α) produziria o instável núcleo do lítio (${}^5\text{Li}$); a união de dois núcleos de ${}^4\text{He}$ criaria um núcleo instável de berílio (${}^8\text{Be}$). A mesma dificuldade acontecia para criar um núcleo estável de carbono (${}^{12}\text{C}$) a partir da união do ${}^4\text{He}$ com o ${}^8\text{Be}$. Além do mais, suas previsões apresentavam resultados contraditórios. Por exemplo, segundo a **Lei de Hubble-Humason** (1929/1934) a idade do Universo seria em torno de 2 bilhões de anos. Por outro lado, a Teoria da Radioatividade aplicada à desintegração dos elementos químicos, principalmente a relação urânio/chumbo (U/Pb), indicava que algumas rochas terrestres tinham uma idade entre 2 e 6 bilhões de anos. Em vista disso, um novo modelo cosmológico foi apresentado, em 1948, pelos astrofísicos, o austro-inglês Sir Hermann Bondi (1919-2005) e o austro-norte-americano Thomas Gold (1920-2004) (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **78**, p. 252), e também por Hoyle (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **108**, p. 372), conhecido como **Universo Estacionário de Bondi-Gold-Hoyle** (UEBGH).

Segundo o UEBGH, na medida em que as galáxias se deslocam afastando-se umas das outras, de acordo com a **Lei de Hubble-Humason**, novas galáxias estão em constante formação nos espaços entre elas, resultante de nova matéria que é continuamente criada. Portanto, *grosso modo*, o Universo pareceria o mesmo em todos os tempos, bem como em todos os pontos do espaço, segundo o **Princípio Cosmológico Perfeito** proposto pelo cosmólogo inglês Edward Arthur Milne (1896-1950), em 1935 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **95**, p. 560), e que fora retomado por Gold para usar no artigo que fez com Bondi. No entanto, para que o UEBGH pudesse explicar a criação contínua da matéria, seus autores tiveram que introduzir modificações na *Teoria da Relatividade Geral de Einstein* (TRGE). É interessante ressaltar que a dificuldade da **nucleossíntese** enfrentada pela teoria do *big bang* e, também, pelo UEBGH, foi resolvida por Hoyle. Para essa solução, ver: [Bassalo, J. M. F. 2007. **Curiosidades da Física 1** (Fundação Minerva, 2007)].

Muito embora o UEBGH tivesse sobrevivido à década de 1950, a descoberta experimental da RCFM, em 1964, fez com que essa teoria fosse abandonada. Vejamos como ocorreu essa descoberta. Estimativas da RCFM haviam sido feitas nas décadas de 1940 e 1950. Em 1964, novas estimativas dessa radiação foram realizadas, independentemente, por Hoyle e Roger J. Tayler, na Inglaterra, e pelo astrofísico russo Yakov Borisovich Zel'dovich (1914-1987), na Rússia. Ainda em 1964, Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson, na *Universidade de Princeton*, estavam tentando construir uma antena para detectar a radiação primordial do início do Universo, pois seus cálculos indicavam que a mesma estaria na faixa de ondas de rádio. No entanto, essa radiação já havia sido detectada acidentalmente, conforme veremos a seguir.

Utilizando uma antena de 20 pés que havia sido construída pela *Bell Telephone Laboratories* em Holmdel, New Jersey, nos Estados Unidos, os radioastrônomos, o alemão Arno Allan Penzias (n.1933; PNF, 1978) e o norte-americano Robert Woodrow Wilson (n.1936; PNF, 1978) mediram por intermédio dos satélites *Echo* e *Telstar*, microondas galácticas de 7,35 cm, em latitudes fora do plano da *Via Láctea*. Desse modo, em certo dia de maio de 1964, descobriram que tais microondas eram independentes da direção apontada pela antena, isto é, eram isotrópicas. Com novas observações, eles verificaram que as mesmas não recebiam variação sazonal e mais, que correspondiam à temperatura de (3.5 ± 1) K. Procuraram, então, possíveis fontes de erro no equipamento utilizado, mas foram totalmente incapazes de explicar o misterioso ruído que haviam detectado. Em vista dessa dificuldade, Penzias discutiu-a com seu amigo Bernard Burke do MIT. Este, então, sugeriu-lhe que contatasse com Dicke, já que seu outro colega Ken Turner, da *Carnegie Institution*, lhe dissera que ouvira Peebles pronunciar uma conferência na *Universidade John Hopkins*, na qual anunciou ser de aproximadamente 10 K a temperatura atual da radiação primordial. Desse modo, Penzias se reuniu com Dicke, e decidiram que escreveriam dois artigos anunciando essa fantástica descoberta: - ***A detecção da radiação correspondente ao big bang***. Esses artigos foram publicados em 1965 no *Astrophysical Journal* **142**, p. 414 (Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson) e p. 419 (Penzias e Wilson). Para maiores detalhes dessa descoberta, ver: Singh (op. cit.); Weinberg, S. **Os Três Primeiros Minutos** (Guanabara Dois, 1980); Weinberg, S. **Para Explicar o Mundo: A Descoberta da Ciência Moderna** (Companhia das Letras, 2015).

Registre-se que os **Modelos do Universo** (MU) construídos tendo como base o que foi desenvolvido neste item **1.7.**, recebeu o nome de **Modelo Padrão do Big Bang** (MPBB).

1.8. Universo Cosmológico Inflacionário

Muito embora a detecção a RCFM, em 1964, tenha dado bastante crédito ao MPBB, este começou a ser contestado nas décadas de 1960 e 1970, em virtude de sua dificuldade em explicar quatro grandes problemas (“puzzles”). O primeiro deles, conhecido como **problema do horizonte** (“horizon puzzle”), refere-se à homogeneidade e isotropia do Universo, e que foi primeiramente registrado pelo físico austro-norte-americano Wolfgang Rindler (n.1924), em 1956 (*Monthly Notices of the Astronomical Society* **116**, p. 663). O segundo, conhecido como **problema da planura** (“flatness puzzle”), foi originalmente apresentado pelos astrofísicos norte-americanos Dicke e Phillip James Edwin Peebles (n.1935), em 1979 (**General Relativity: An Einstein Centenary Survey** (Cambridge University Press), e diz respeito à densidade Ω de massa do Universo, cujo valor, de acordo com o BB, é dado por: $\Omega - 1$ proporcional a $t^{2(1-n)}$, com $n < 1$. Assim, se $\Omega < 1$, a densidade de massa é insuficiente para deter a expansão, e o Universo continuará a expandir-se para sempre. Geometricamente significa dizer que o Universo é **aberto**, caracterizado por uma **Geometria Hiperbólica** ou **Geometria de Lobachevski** (1826)-**Bólyai** (1832). Se $\Omega > 1$, a expansão acabará, e o Universo presumivelmente colapsará em outra “bola de fogo” – o **big crunch** -, significando que ele é **fechado**, caracterizado por uma **Geometria Esférica** ou **Geometria de Riemann** (1851). Se $\Omega = 1$, então a expansão seguirá para sempre, e sempre diminuindo, mas sem chegar nunca a parar totalmente. Nessa situação, diz-se que o Universo é **plano**, caracterizado por uma **geometria plana** ou **Geometria de Euclides** (~ Século 3 a.C.), e que seu equilíbrio é instável. Dada essa instabilidade, é surpreendente que dados experimentais indicam que: $0,01 < \Omega < 10$, valores esses que não permitem definir a geometria do Universo. Além do mais, para um segundo após o BB, $\Omega \neq 1$, apenas para uma parte em 10^{15} , resultado esse que o BB não explica. Para justificar porque $\Omega \approx 1$ no começo do Universo, usa-se o **Princípio Antrópico de Hoyle** (leis do Universo compatíveis com a existência do Homem). O terceiro dos problemas enfrentados pela teoria BB relaciona-se com as **inhomogeneidades** (“inhomogeneity puzzle”) do Universo observável, composto de galáxias, aglomerados de galáxias e

superaglomerados de galáxias, uma vez que, por aquela teoria, esse espectro de não-uniformidade deve ser considerado *ad hoc* no BB, como parte de suas condições iniciais. Por fim, o quarto problema tem a ver com a produção de **monopolos magnéticos** (MM) na ocasião do início do Universo, daí esse problema ser conhecido como o **problema dos monopolos** (“monopole puzzle”). Registre que, segundo a **Teoria da Grande Unificação** (TGU) (1972/1974), o próton é uma partícula instável (vida média $\approx 10^{31}$ anos) e tem o MM como um dos produtos de seu decaimento. Além do mais, a TGU prevê a produção de um número demasiadamente grande de MM, cerca de 100 vezes mais do que átomos e, no entanto, tais partículas [previstas pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1931 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A133**, p. 6)] ainda não foram observadas.

Para contornar os problemas apresentados pelo BB descritos acima, acrescido da presença incômoda da **Constante Cosmológica Einsteniana** (Λ), os físicos, o russo Alexei Alexandrovich Starobinsky (n.1948), em 1979 (*Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* **30**, p. 719) e o norte-americano Alan Harvey Guth (n.1947), em 1981 (*Physical Review* **D23**, p. 347), formularam o **Modelo Cosmológico Inflacionário**, segundo o qual o Universo teria também começado com um BB, ocorrido entre 15 e 20 bilhões de anos atrás, porém, logo em seu começo sofreu um período de expansão muito acelerada, isto é, uma **inflação**, durante o qual o Universo passou do tamanho de um próton para o tamanho de uma uva (aumentou cerca de 10^{50} vezes), durante o período de 10^{-35} segundos contado a partir do BB. Esse modelo apresentou explicações para três dos problemas apontados acima. Com efeito, como o Universo teria sido muito maior no fim do **período inflacionário** do que o previsto pelo BB, o espaço seria muito mais achatado, o que explicaria o **problema da planura**. Por outro lado, por ser mais chato e liso o Universo na época da transição de fase entre a época inflacionária e o ritmo linear do Universo de hoje, produziram-se muito menos MM, o que resolveria o **problema dos MM**. Quanto ao **problema do horizonte**, o **Modelo Cosmológico Inflacionário de Starobinsky-Guth** (MCIS-G) apresentou a seguinte explicação. Logo que o Universo se iniciou, sofreu um tipo de super-resfriamento, produzindo um “congelamento” das forças eletromagnética, fraca e forte, não havendo, portanto, a quebra dessa simetria (ocorrida depois de 10^{-35} s contado a partir do BB) ocasionando então um estado instável, com mais energia do que se a simetria fosse quebrada. Desse modo, quando ocorreu a fase inflacionária, quaisquer irregularidades do Universo foram simplesmente

aplainadas, daí a sua homogeneidade e isotropia atuais. O estado mais energético do Universo referido acima, considerado como um estado de energia latente, chamado de **Campo de Higgs de Valor Zero**, foi interpretado como se tivesse um efeito antigravitacional, e teria agido como a **constante cosmológica einsteiniana** (Λ). Nesse Universo mais energético, no qual a expansão fosse mais acelerada (pela ação de Λ) do que retardada pela atração gravitacional haveria tempo suficiente para a luz impregnar de informação todo o Universo.

Muito embora o MCIS-G tivesse contornado as dificuldades do BB, conforme vimos acima, aquele modelo apresentava outro problema, pois, se a fase de transição entre o Universo “super-resfriado” e o estado de expansão linear atual ocorresse subitamente, haveria a formação de “bolhas” (como ocorre no surgimento de cristais de gelo em qualquer água superfria) que se expandiriam gradualmente e se juntariam umas às outras, até a situação de expansão linear do Universo que perdura até hoje. Contudo, mesmo que as “bolhas” crescessem à velocidade da luz, estariam se afastando umas das outras e, portanto, nunca se juntariam. Essa dificuldade foi resolvida, em 1982, em trabalhos independentes realizados pelos físicos, o russo Andrei Dimitrievich Linde (n.1948) (*Physics Letters* **B108**, p.398), e os norte-americanos Andreas J. Albrecht (n.1957) e Paul J. Steinhardt (n.1952) (*Physical Review Letters* **48**, p. 1220), ao formularem o **Novo Modelo Cosmológico Inflacionário** (NMCI), segundo o qual o fato de as “bolhas” não se juntar poderia ser evitado se fossem tão grandes que nossa região do Universo estivesse toda contida numa única bolha. No entanto, para que isso ocorresse, a “quebra de simetria” deveria acontecer muito lentamente dentro da “bolha”, o que é perfeitamente possível de acordo com a TGU, por intermédio de um mecanismo denominado de **transição de rolamento lento** (“slow rolleyer transition”).

Novos problemas foram encontrados no NMCI como, por exemplo, o fato de que a “bolha” única deveria ser maior do que o Universo à época, conforme foi mostrado pelo astrofísico inglês Stephen William Hawking (1942-2018) e seus colaboradores Ian G. Moss e John M. Stewart, em 1982 (*Physical Review* **D26**, p. 2681), e que as flutuações quânticas iniciais deveriam crescer mais do que o esperado, indicando um **tempo de rolamento** muito mais lento. O próprio Linde, em 1983 (*Physics Letters* **B129**, p.177), apresentou o **Modelo Cosmológico Inflacionário Caótico**, no qual não há transição de fase ou super-resfriamento. A ideia central desse modelo consiste em supor uma distribuição inicial caótica de um **Campo ϕ de Bósons de Higgs** [esses bósons foram propostos pelo

físico inglês Peter Ware Higgs (n.1929; PNF, 2013), em 1964 (*Physics Letters* **12**, p.132; *Physical Review Letters* **13**, p.508), como um mecanismo (MH) gerador de massa das partículas elementares], cujas flutuações quânticas gerariam um estado de energia positiva [efeito gravitacional positivo (repulsivo), equivalente à constante Λ] capaz de compensar a atração gravitacional negativa, de modo que a energia total do Universo seja **completamente nula**. Registre que Hawking afirmou que o **modelo inflacionário** e suas variantes não explicam porque a configuração inicial do Universo não foi suficiente para produzir alguma coisa diferente da que vemos hoje e, desse modo, ele acredita que tal modelo está falido, restando apenas voltar ao **Princípio Antrópico de Hoyle** para base de sustentação daqueles modelos. É interessante destacar que, em 1983 (*Astrophysical Journal* **270**, p. 365), o físico israelense Mordehai Milgrom (n.1946) propôs a MOND (“Modified Newtonian Dynamics”), uma modificação da gravitação newtoniana, que só vale até um determinado limite. [Stephen Hawking, **Uma Breve História do Tempo** (Rocco, 1988); Smoot, G. e Davidson, K. **Dobras no Tempo** (Rocco, 1995); Guth, A. H. **O Universo Inflacionário** (Campus, 1997); Greene, B. 2001/2005. **O Universo Elegante e Tecido do Cosmos** (Companhia das Letras, 2001/2005); Magueijo, J. C. R. **Faster than the Speed of Light** (Perseus Publishing, 2002)].

Aparentemente resolvidos os principais problemas do BB por intermédio do **modelo inflacionário** e outros dele decorrentes, restou o problema da singularidade inicial prevista pela TRGE, problema esse que apresenta uma grande dificuldade, já que na **era de Planck** – intervalo ($0 - 10^{-41}$) seg -, as leis da Física não se aplicam. Para contornar tal dificuldade, Hawking e o físico norte-americano Lee Smolin (n.1955), em trabalhos independentes e a partir da metade da década de 1970, realizaram estudos sobre a quantização da gravitação, os quais, contudo, estão fora do contexto deste texto. Note que, na **Era de Planck**, as grandezas fundamentais – comprimento (l_p), massa (m_p) e tempo (t_p) - são assim definidos: - $l_p = hG/c^3 \approx 10^{-33}$ cm, $m_p = (ch/G)^{1/2} \approx 10^{-3}$ g e $t_p = (Gh/c^3)^{1/2} \approx 10^{-43}$ s, onde h é a **Constante de Planck**, G é a **Constante de Gravitação de Newton-Cavendish**.

Então, dificuldades com os **modelos cosmológicos do Universo** levaram ao desenvolvimento de novos modelos, dos quais, destacamos: 1) **Dynamical Eternal Universe Scenario (DEUS)** proposto, em 1982 (*CBPF-CS-001/82*), pelo cosmólogo brasileiro Mario Novello (n.1942); 2) **Modelo Cosmológico Quase Estacionário** proposto, em 1993 (*Astrophysical Journal* **410**, p. 437), pelos astrofísicos, os ingleses Fred Hoyle e Geoffrey

Roland Burbidge (n.1925) e o indiano Jayant Vishu Narlikar (n.1938); 3) **Modelo Cosmológico Inflacionário Aberto** proposto, em 1995 (*Physical Review D* **52**, p. 1837), por Bharat Ratra e Peebles; 4) **Modelo VSL** (“Varying Speed of Light”) proposto, em 1999 (*Physical Review D* **59**, p. 043516), pelos cosmólogos, o norte-americano Albrecht e o português João Carlos Rosa Magueijo (n.1967).

Ainda é oportuno registrar que, em 30 de junho de 2001, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) lançou o satélite chamado *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) (“Sonda Anisotrópica de Microondas Wilkinson”), projetado para medir a RCFM, sendo sua missão encerrada em setembro de 2003. Durante três anos a equipe do WMAP examinou os dados recebidos desse satélite e, em março de 2006, Charles Leonard Bennett (n.1956) [membro dessa equipe juntamente com David Spergel (n.1961) e Gary F. Hinshaw (n.1959)] anunciaram que o nosso Universo tem a idade de $(13,73 \pm 0,15)$ bilhões de anos, e que $\Omega = 1,024 \pm 0,015$, o que significa dizer que o nosso Universo possui uma **Geometria Praticamente Euclidiana** e que se expandirá para sempre, sem a possibilidade de haver um **big crunch**.

Para completar o estudo do UCI realizado neste item **1.8.**, indicamos uma leitura complementar, composta pelos textos: Weinberg, 1980 (op. cit.); Hawking, 1988 (op. cit.); Smoot, G. e Davidson, K. (op. cit.); Guth, A. H. (op. cit.); Greene, B. (op. cit.); Magueijo, J. C. R. (op. cit.); Hawking, S. e Mlodinow, L. **Uma Nova História do Tempo** (Ediouro, 2005); Abdalla, M. C. B. e Villela Neto, T. 2005. **Novas Janelas para o Universo** (EDUNESP/2005); Novello, M. **O Que é Cosmologia? A Revolução do Pensamento Cosmológico** (Jorge Zahar, 2006); Cherman, A. e Mendonça, B. R. op. cit.); Novello, M. **Do Big-Bang ao Universo Eterno** (Zahar, 2010); Weinberg, 2015 (op. cit.); Novello, M. **Os Cientistas da Minha Geração** (Livraria da Física, 2016); Novello, M. **O Universo Inacabado: A Nova Face da Ciência** (n – 1 Edições, 2018).



ANTERIOR

